



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES DE $\text{Cu}_n\text{O}/\text{ZnO}$ CON
IMPLEMENTACIÓN DE MICROPARTÍCULAS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:
CARLOS ALFONSO LUNA MAYO**

DR. ERICK FLORES ROMERO



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por su apoyo y valiosos recursos brindados para la realización de este proyecto.

A la Facultad de Química por permitirme estudiar una licenciatura de calidad.

Al Instituto de Física por permitirme desarrollar el presente trabajo en sus instalaciones.

Índice general

Agradecimientos	II
1. Objetivo	1
1.1. Objetivos Particulares	1
2. Introducción	2
3. Conceptos Básicos	5
3.1. Teoría de Bandas	5
3.1.1. Conducción en teoría de bandas	6
3.1.2. Resistividad eléctrica de los metales	6
3.1.3. Materiales Semiconductores	7
3.1.4. Concepto de Hueco	8
3.1.5. Influencia de Impurezas	8
3.1.6. Influencia de la Temperatura	9
3.1.7. Semiconductores Extrínsecos	9
3.1.8. Semiconductores Extrínsecos de tipo n	9
3.1.9. Semiconductores Extrínsecos de tipo p	9
3.1.10. Junta materiales n-p	9
3.1.11. Efecto Hall	11
3.1.12. Polarización de uniones n-p	11
3.2. Síntesis de micropartículas	12
3.2.1. SOL-GEL	12
3.2.2. Reacciones Implicadas	13
4. Metodología	17
4.1. Celda solar de óxidos de cobre y zinc	17
4.1.1. Oxidación del cobre	17
4.1.2. Oxidación del zinc a partir de electrodeposito	18
4.1.3. Preparación de pasta de óxido de zinc	19
4.1.4. Preparación de la celda solar	20
4.2. Depósito de micropartículas	21

4.2.1. Limpieza de sustratos	21
4.2.2. Síntesis de micropartículas	22
4.2.3. Depósito de micropartículas	23
4.3. Caracterización de micropartículas	24
4.4. Caracterización de celdas solares	24
4.4.1. Potencial eléctrico	24
4.4.2. Curvas de reflectancia	25
4.4.3. Curvas de transmitancia	26
4.4.4. Curvas de Polarización	27
5. Resultados y análisis	28
5.1. Sustratos producto de la Oxidación del Cobre	28
5.2. Sustratos con electrodeposición de Óxido de Zinc	30
5.3. Pasta de óxido de zinc y ensamblado de celda	32
5.4. Caracterización de Potenciales Eléctricos de las Celdas Solares	33
5.4.1. Explicación del desempeño de los Óxidos	34
5.4.2. Curvas de polarización	35
5.4.3. Depósito de micropartículas	37
5.4.4. Curvas de Reflectancia	39
5.4.5. Curvas de transmitancia	46
5.5. Resumen de resultados de curvas de reflectancia y transmitancia	50
6. Conclusiones	51
7. Bibliografía	53

Índice de figuras

2.1. Comparación de los principales contaminantes producidos por la industria eléctrica en los Estados Unidos.[Merino 2016]	3
2.2. Diagrama de pastel sobre la generación de energías renovables en México 2018.[SENER]	4
3.1. Representación gráfica de los niveles de energía donde se encuentra cada una de las bandas en los materiales sólidos.[Zimmer]	6
3.2. Movimiento de los electrones hacia los huecos en presencia de un campo eléctrico.[Zimmer]	7
3.3. Representación de la banda prohibida en materiales conductores, semiconductores y aislantes.[Farrera 2015]	8
3.4. Representación del silicio cristalino dopado con impurezas del grupo V.[Zimmer]	10
3.5. Junta material n-p	10
3.6. Símbolo de un diodo semiconductor, en la imagen se muestran los sentidos del paso y bloqueo de la corriente.	11
3.7. Esquema de un diodo semiconductor aplicando un voltaje en polarización directa 3.7a e inversa 3.7b.	12
3.8. Curva característica del diodo semiconductor mostrando la polarización directa del lado derecho de la gráfica y la inversa del lado izquierdo.[Merino 2014]	12
3.9. Mecanismo de reacción de hidrolización con respecto al precursor TEOS.	13
3.10. Mecanismo de reacción para la etapa inicial de condensación.	14
3.11. Etapa de polimerización durante la reacción de condensación.	15
3.12. Etapa final de la reacción de polimerización.	16
4.1. Diagrama de Pourbaix del zinc en agua a 25°C. [Beverkog1997]	19
4.2. Esquema del arreglo tipo <i>sándwich</i> de una celda solar de semiconductores n-p.	20
4.3. Esquema de preparación de síntesis usando un enfriador de serpentín.	23
4.4. Proceso de spin-coating para obtener una película delgada. a) Depósito de una gota de emulsión de micropartículas. b) Eliminación del exceso de solución. c) Formación de una película delgada. d) Evaporación del exceso de disolvente.	24

4.5. Arreglo del espectrofotometro	25
4.6. Arreglo para medición de transmitancia	26
4.7. Arreglo utilizando una fuente de poder y un multímetro para obtener la curva de polarización.	27
5.1. Formas de la oxidación del cobre en procesos diferentes.	28
5.2. Depósito de óxido de zinc en sustratos de vidrio(derecha) e ITO (izquierda)	30
5.3. Electrodeposición de zinc en vidrio ITO a partir de acetato de zinc.	31
5.4. Prototipo de celda de arreglo tipo sándwich utilizando junta de semiconductores n-p	32
5.5. Tabla de diferencia de potencial generado por las celdas	33
5.6. Comparación de diferencia de potencial promedio de los diferentes materiales.	33
5.7. Curva de polarización de la muestra 1209181	35
5.8. Curva de polarización de la muestra 1209182	36
5.9. micropartículas de sílice sintetizadas por sol-gel en un vidrio ITO	37
5.10. Gráfica de frecuencias de los tamaños de las micropartículas de sílice	38
5.11. Curva de reflectancia de vidrio ITO obtenida con espectrofotómetro Ocean Optics USB-4000	39
5.12. Curva de reflectancia de cobre obtenida con espectrofotómetro Ocean Optics	40
5.13. Curva de reflectancia de ZnO obtenida con espectrofotómetro Ocean Optics USB-4000	41
5.14. Curva de reflectancia del óxido de cobre (I).	42
5.15. Curva de reflectancia del óxido de cobre (II).	43
5.16. Curva de reflectancia comparación ITO e ITO-micropartículas.	44
5.17. Curva de reflectancia comparando los componentes de la celda.	45
5.18. Curva de transmitancia de ITO.	46
5.19. Curva de transmitancia ITO-micropartículas	47
5.20. Curva de transmitancia ITO-micropartículas.	48
5.21. Comparativa de las curvas de transmitancia	49

Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis es establecer un procedimiento para fabricar celdas solares con óxidos metálicos específicamente de cobre y zinc, depositar una capa de micropartículas de sílice sobre la superficie de las celdas y determinar si mejoran las propiedades ópticas de la celda.

1.1. Objetivos Particulares

- Experimentar con diferentes técnicas la producción de los óxidos metálicos para la fabricación de las celdas.
- Analizar los pros y contras de cada una de las técnicas utilizadas en la producción de los óxidos metálicos.
- Establecer una metodología para obtener un prototipo de celda solar.
- Depositar micropartículas de sílice sobre la superficie de la celda.
- Caracterizar las celdas y cuantificar cambios generados por las micropartículas.
- Generar una propuesta de celda solar de bajo costo que cuente con un bajo nivel de contaminantes en su producción.

Introducción

De las principales problemáticas que enfrenta nuestro país es el suministro de energía eléctrica, esta debe poder estar al alcance de todos y además debe ser parte de un proceso sustentable evitando la mayor cantidad de emisiones posibles, ya que el efecto invernadero es una realidad que tiene preocupado al mundo.

En México, la Secretaría de Energía (**SENER**) reporta la capacidad de generación de energía eléctrica de forma **bruta y efectiva**; la primera refiriéndose a la energía que empresas nacionales como la Comisión Federal de Electricidad (**CFE**) puede generar junto con los productores de energía externos (**PEE**). La segunda refiere a la energía que es aprovechada en los hogares, industrias, hospitales, etc.

En estos datos cabe resaltar que la mayoría de la producción del país es proveniente de los **PEE** principalmente obtenido por medio de un proceso llamado ciclo combinado, en el cual se produce energía a partir de la composición de dos ciclos; el primero asociado a una turbina de gas aprovechando la energía mecánica del gas y el segundo por una turbina de vapor obtenida por la quema de este en una caldera aprovechando su energía térmica. Este proceso es el más utilizado según los datos de **SENER** con una producción del 37% alcanzada por los **PEE** y un 21% generada por la **CFE**. Sumando estos números se obtiene casi el 60% de la producción nacional, a este le sigue la industria termoeléctrica, siendo la productora del 20% de la energía bruta, los procesos que esta involucra son diversos; dentro de los más comunes están las turbinas de vapor, quema de turbogas y otros combustibles como el combustóleo.[**SENER**]

El departamento de Energía de los Estados Unidos reporta la cantidad de diferentes emisiones producidas en las muchas formas de generar energía, como se observa en la figura 2.1, donde se puede observar que el mayor generador de contaminantes es la industria de carbón con 1,066ton por *GWh* producido. La industria del ciclo combinado, aunque más eficiente sigue generando una buena parte de contaminantes por *GWh* producido con 825ton. De estas, cabe resaltar que una de las industrias más limpias es la energía solar con apenas 5ton por *GWh*.

COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS DIFERENTES FORMAS DE PRODUCIR ELECTRICIDAD (Emisiones de contaminantes para todo el ciclo productivo; en toneladas por GWh producido.)								
Fuente	CO ₂	NO _x	SO ₂	Partículas sólidas en suspensión	CO	Hidrocarburos	Residuos nucleares	Total
Carbón	1,058.200	2.986	2.971	1.626	0.267	0.102	-	1,066.152
Gas Natural (**)	824.000	0.251	0.336	1.176	TR	TR	-	825.763
Nuclear	8.600	0.034	0.029	0.003	0.018	0.001	3.641	12.326
Fotovoltaica	5.900	0.008	0.023	0.017	0.003	0.002	-	5.953
Biomasa	TR	0.614	0.154	0.512	11.361	0.768	-	13.409
Geotérmica	56.800	TR	TR	TR	TR	TR	-	56.800
Eólica	7.400	TR	TR	TR	TR	TR	-	7.400
Solar térmica	3.600	TR	TR	TR	TR	TR	-	3.600
Hidráulica	6.600	TR	TR	TR	TR	TR	-	6.600

TR: Trazas. (**): Gas natural en ciclo combinado.
La emisión de biomasa en ciclo combinado presupone la regeneración anual de la cantidad consumida, lo que rara vez sucede.

Figura 2.1: Comparación de los principales contaminantes producidos por la industria eléctrica en los Estados Unidos.[Merino 2016]

Las energías renovables son aquellas: “Cuya fuente reside en un fenómeno de la naturaleza, proceso o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano”[SENER 2018].

En México hay una pequeña participación de las energías renovables siendo estas el 17% de la producción nacional, como principal protagonista la hidroeléctrica, la cual produce el 10% neto. En la gráfica de pastel proporcionada por la SENER figura 2.2 se puede observar que el aporte de energía generada por turbinas eólicas sumada con la energía solar es menos del 5% siendo esta última el 0.72% [SENER 2018].

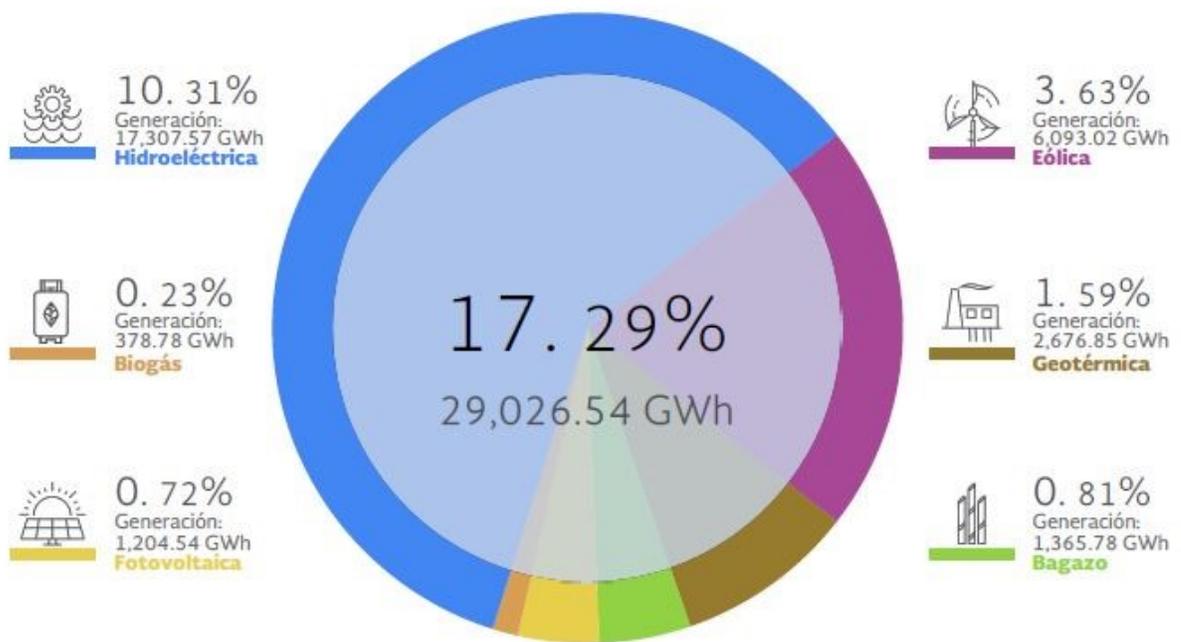


Figura 2.2: Diagrama de pastel sobre la generación de energías renovables en México 2018.[SENER]

Conceptos Básicos

En este capítulo se explicarán los conceptos básicos que están relacionados en el funcionamiento de las celdas solares, lo que se emplea comúnmente para su producción y por último los conceptos requeridos para la elaboración de la síntesis de micropartículas de SiO_2 y su aplicación como películas delgadas.

3.1. Teoría de Bandas

Esta teoría explica el comportamiento de la conductividad eléctrica y térmica de los materiales; se fundamenta en los niveles de energía que presentan los átomos, así como sus orbitales, el número que admite cada uno según el principio de exclusión de Pauli y las reglas básicas que establece la mecánica cuántica. La teoría tiene como punto base los niveles de energía cuantizados, solo que en lugar de hablar de niveles de energía se utilizaran bandas, ya que no se tiene un átomo aislado, más bien un material compuesto de una gran cantidad de átomos, cada uno con su correspondiente nivel de energía; por lo tanto, estos átomos se aproximan unos a otros además de los electrones perturbados por los electrones y núcleos de átomos adyacentes. Esta perturbación es tal que cada nivel de energía se divide o “desdobla” en una serie de estados electrónicos distintos pero muy próximos que forman una banda de energía.

Se pueden definir tres tipos de bandas de energía:

- Banda de valencia: La cuál contiene a los electrones de mayor energía, o sea a los electrones de valencia.
- Banda de conducción: Es la banda que por lo general se encuentra vacía.
- Banda prohibida: Es la banda que se encuentra en medio de la banda de conducción y la de valencia.

En la figura 3.1 se puede observar que en medio esta la banda prohibida, la cual dependiendo de la distancia energética que haya entre las bandas se puede hablar de un material: conductor, aislante o semiconductor.

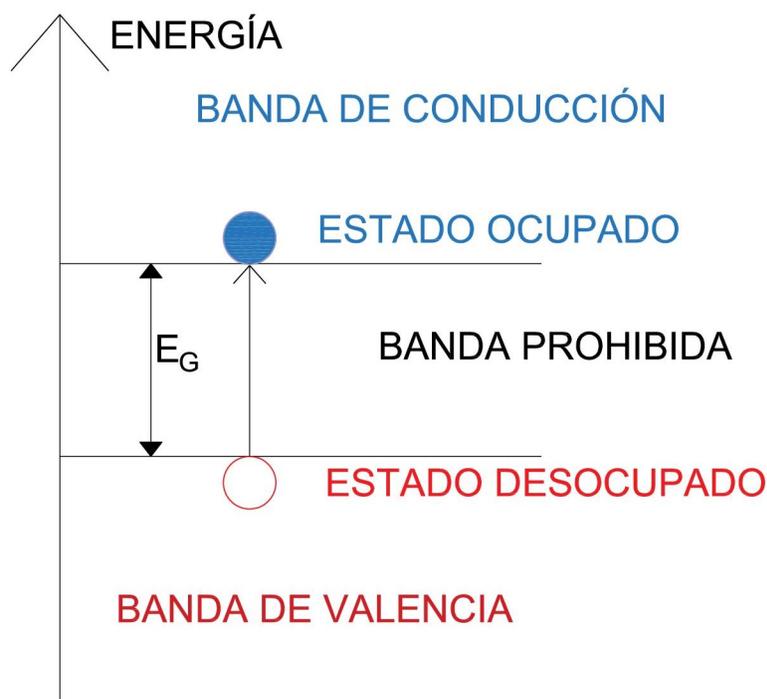


Figura 3.1: Representación gráfica de los niveles de energía donde se encuentra cada una de las bandas en los materiales sólidos.[Zimmer]

3.1.1. Conducción en teoría de bandas

Los electrones que van a poder ser acelerados en presencia de un campo eléctrico son aquellos que tengan una energía mayor a la energía de Fermi. Estos serán los electrones que podrán participar en el proceso de conducción los cuales se denominan *electrones libres*. En los materiales semiconductores y aislantes se encuentra otra entidad electrónica llamada *hueco* el cual se considera con carga positiva ya que es un punto con ausencia de electrón libre el cual puede ser ocupado como se muestra en la figura 3.2.

3.1.2. Resistividad eléctrica de los metales

Los metales tienen conductividades elevadas debido a su alto número de electrones libres que han sido excitados hacia los estados vacíos por la energía de Fermi, la conductividad de los materiales se puede expresar como:

$$\sigma = n|e|\mu_e \quad (3.1)$$

donde n representa el número de electrones libres por unidad de volumen, $|e|$ es el valor absoluto de la carga eléctrica sobre cada electrón y μ_e se denomina movilidad electrónica, es el indicador de la frecuencia de los sucesos de dispersión; sus unidades son (m^2/Vs).

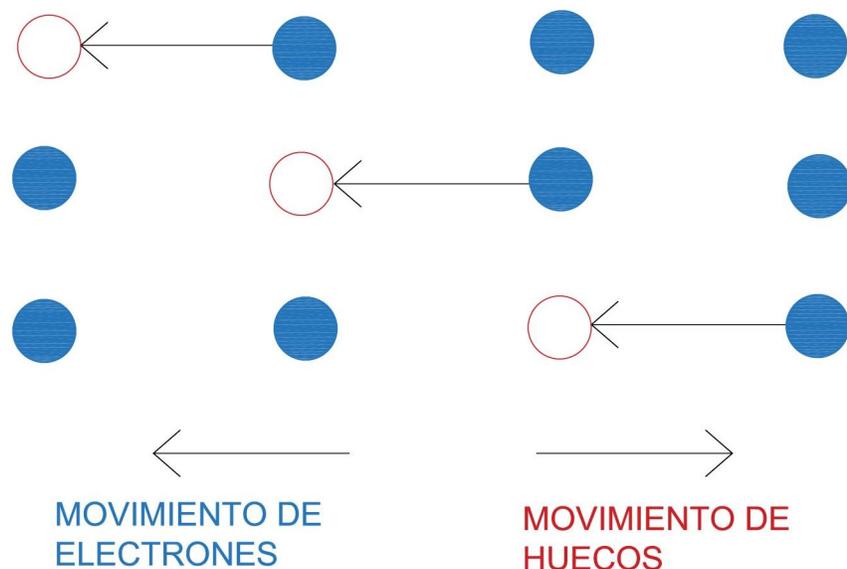


Figura 3.2: Movimiento de los electrones hacia los huecos en presencia de un campo eléctrico.[Zimmer]

3.1.3. Materiales Semiconductores

En los materiales metálicos existen estados vacíos contiguos al nivel ocupado de mayor energía, por lo que se requiere poca energía para promover un electrón libre. En el caso de los aislantes y de los semiconductores no es así, ya que para que los electrones se hagan libres hay que superar un intervalo prohibido para acceder a los primeros niveles de energía de la banda de conducción, mientras mayor sea esta banda prohibida el material se considerara más aislante como se muestra en la figura 3.3. Frecuentemente la excitación que requieren dichos electrones proviene de una fuente no eléctrica como la luz y el calor.

Se pueden clasificar en dos categorías diferentes:

- **Semiconductores intrínsecos:** Son aquellos cuyo comportamiento eléctrico depende del material puro.
- **Semiconductores extrínsecos:** Son aquellos cuyo comportamiento depende de la cantidad de átomos de impureza.

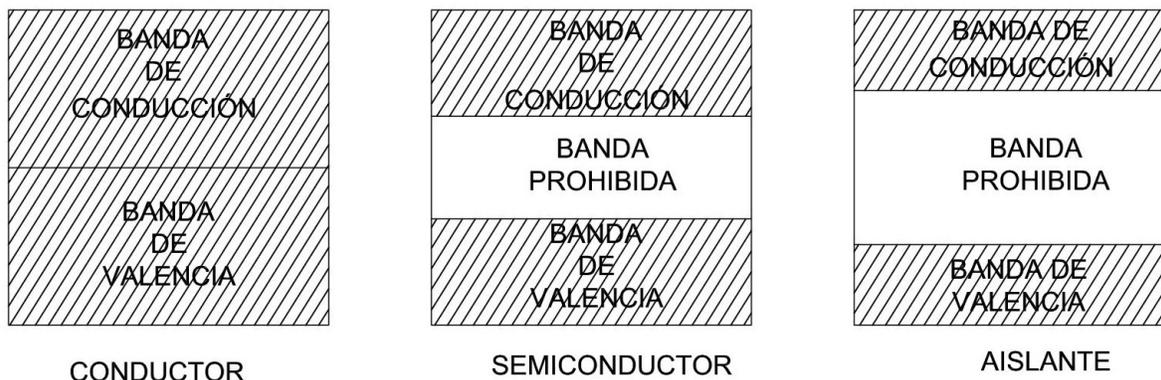


Figura 3.3: Representación de la banda prohibida en materiales conductores, semiconductores y aislantes.[Farrera 2015]

3.1.4. Concepto de Huevo

En los semiconductores intrínsecos, cada electrón excitado en la banda de conducción deja atrás a un “electrón ausente” en uno de los enlaces covalentes o bien un estado electrónico vacante. Como se vio en la subsección 3.1.3 los electrones pueden ser excitados por luz o calor y de esta manera completar el enlace en otro átomo, dejando atrás a un “electrón ausente” y de esta manera sucesivamente. Por consiguiente, se puede imaginar que hay un flujo de electrones en diferentes posiciones liberando y ocupando dichos lugares. Este proceso se simplifica tratando al electrón ausente como una partícula cargada positivamente llamada *hueco*. Se considera que un *hueco* tiene una carga de la misma magnitud que el electrón, pero de signo opuesto ($+1.6 \times 10^{-19}C$). Por consiguiente, en presencia de un campo eléctrico los electrones y huecos excitados son dispersados por las imperfecciones de la red.

3.1.5. Influencia de Impurezas

Para un determinado tipo de impurezas en disolución sólida, la componente de la resistividad debido a impurezas, ρ_i , está relacionada con la concentración de impurezas C_i en términos de la fracción atómica de la manera siguiente:

$$\rho_i = AC_i(1 - C_i) \quad (3.2)$$

donde A es una constante independiente y es función tanto de la pureza como del disolvente. En el caso de aleaciones bifásicas, que consisten en fases beta y alfa, se puede utilizar una ley de mezclas para aproximar la resistividad de la siguiente manera:

$$\rho_i = \rho_a V_a + \rho_b V_b \quad (3.3)$$

donde los símbolos V y ρ representan las fracciones de volumen y resistividades de las fases individuales respectivamente.

3.1.6. Influencia de la Temperatura

Para un metal puro y sus respectivas aleaciones, la resistencia aumenta linealmente con la temperatura, hasta llegar a un equilibrio en el cual la resistencia se vuelve asintótica. En la ecuación 3.4 se puede observar el comportamiento lineal de la en función de la temperatura.

$$\rho_t = \rho_0 + aT \quad (3.4)$$

donde ρ_0 y a son constantes para cada metal. La dependencia de estas con respecto a la temperatura se debe, al que aumentando esta las vibraciones y otras irregularidades de la red, actúan como centros de dispersión de los electrones.

3.1.7. Semiconductores Extrínsecos

Como se mencionó en la subsección 3.1.3 los semiconductores extrínsecos dependen de impurezas. En esta sección abordaremos más a fondo el funcionamiento de dichos materiales. Los semiconductores extrínsecos al tener presentes impurezas incluso en pequeñas concentraciones, introducen electrones o huecos en exceso. Por ejemplo, una concentración de impurezas de un átomo en 1×10^{12} es suficiente para convertir al silicio en un semiconductor extrínseco a temperatura ambiente.

3.1.8. Semiconductores Extrínsecos de tipo n

En un semiconductor tipo n, el número de *electrones libres* es mucho mayor que el número de *huecos*, de este modo se habla que es un portador de carga negativa mayoritario.

Para ilustrar este concepto, supongamos que a un cristal de silicio se le adiciona una impureza de un elemento de la columna V de la tabla periódica. Las impurezas se colocan dentro de la red cristalina por sustitución como se muestra en la figura 3.4

3.1.9. Semiconductores Extrínsecos de tipo p

Para la conducción tipo p, la concentración de *huecos* es mucho mayor que la de *electrones libres* ($p \gg n$) por lo tanto hay un exceso de carga mayoritaria positiva. Para los semiconductores de tipo p, el nivel de energía de Fermi está situado dentro del intervalo prohibido, cerca del nivel de los aceptores, por lo que estos materiales son aceptores de carga, permitiendo el flujo de corriente eléctrica.

3.1.10. Junta materiales n-p

Los semiconductores extrínsecos se fabrican a partir de materiales que inicialmente tienen una pureza muy alta. Entonces se añaden concentraciones controladas de donadores o aceptores usando diversas técnicas; este proceso se llama **dopado**.

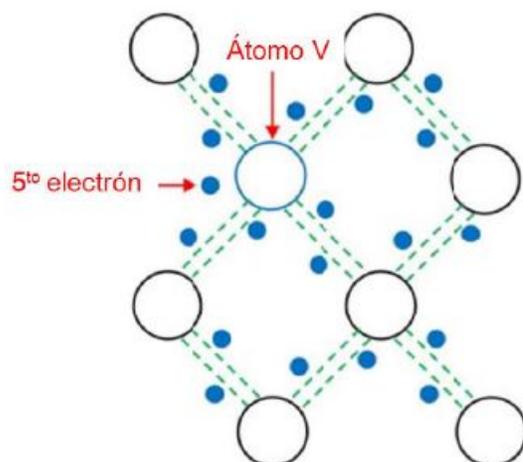


Figura 3.4: Representación del silicio cristalino dopado con impurezas del grupo V. [Zimmer]

Los semiconductores de junta n-p, son eléctricamente neutros, sin embargo, cuando un material del grupo IV como el silicio es tratado con impurezas del grupo V o grupo III, aparece una fuerza a través de la unión de naturaleza electroquímica, que se manifiesta en una atracción de electrones del material n, por el material p. El exceso de electrones en el material n y la deficiencia de estos en el material p provocan que los electrones abandonen su lugar en el material n y se transporten a la estructura del material p. Como consecuencia, la zona (muy fina) adyacente a la unión, del lado de la estructura p del cristal es cargada negativamente, mientras que la zona similar, pero ahora del lado de la estructura del material n, es cargada positivamente figura 3.5. [Farrera 2015].

Este tipo de uniones constituye lo que se denomina un *diodo semiconductor* figura 3.6

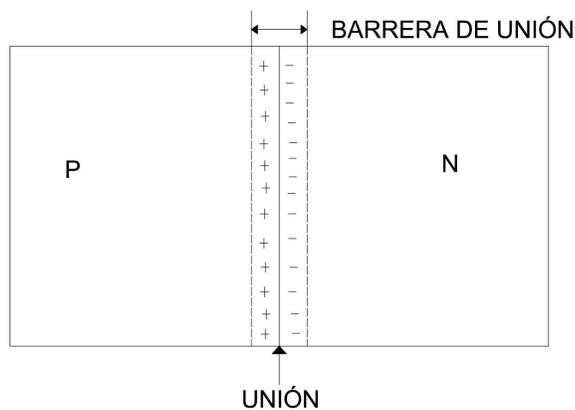


Figura 3.5: Junta material n-p

y es un elemento muy útil en sistemas de rectificación de corriente alterna.

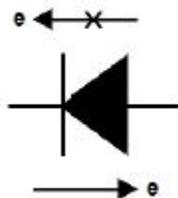


Figura 3.6: Símbolo de un diodo semiconductor, en la imagen se muestran los sentidos del paso y bloqueo de la corriente.

3.1.11. Efecto Hall

Para determinar el tipo de transportador mayoritario en un material, su concentración y su movilidad. Es posible mediante el **efecto Hall**. Este es el resultado por el cual un campo magnético aplicado perpendicularmente a la dirección del movimiento de una partícula cargada ejerce una fuerza sobre la partícula que es perpendicular tanto al campo magnético como a la dirección del movimiento de la partícula. Por lo anterior este es el principio básico del funcionamiento de las celdas solares, ya que al tener un campo magnético incidente que en este caso es la radiación electromagnética del sol, la cual es aplicada en una superficie de forma perpendicular donde se encuentran partículas cargadas como lo es nuestro semiconductor de junta n-p genera una diferencia de potencial el cual se conoce como *voltaje de Hall* V_H donde su magnitud dependerá de la corriente aplicada I_x , el campo magnético B_z y el espesor de la superficie de la manera siguiente:

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{d} \quad (3.5)$$

En la ecuación 3.5 el valor R_H se denomina *coeficiente Hall*, el cual es una constante para cada material.

3.1.12. Polarización de uniones n-p

Las uniones n-p se pueden polarizar de forma *directa* o *inversa*, la polarización de forma directa se obtiene cuando los electrones se alimentan en la zona semiconductor tipo *n*, el voltaje aplicado rompe la barrera de oposición de la unión la cual permite un paso de la corriente apreciable figura 3.7a Por el contrario, si los electrones se alimentan por la zona del semiconductor tipo *p*, el paso de la corriente es bloqueado, esto debido a que el voltaje aplicado con *polarización inversa* no es capaz de vencer la barrera de oposición figura 3.7b. En consecuencia, estos *diodos semiconductores* son muy útiles para la construcción de sistemas de rectificación.

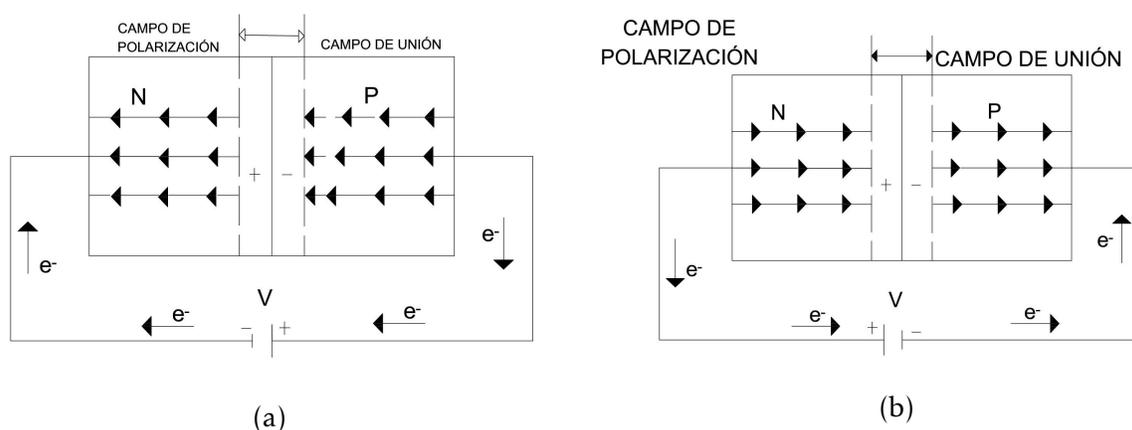


Figura 3.7: Esquema de un diodo semiconductor aplicando un voltaje en polarización directa 3.7a e inversa 3.7b.

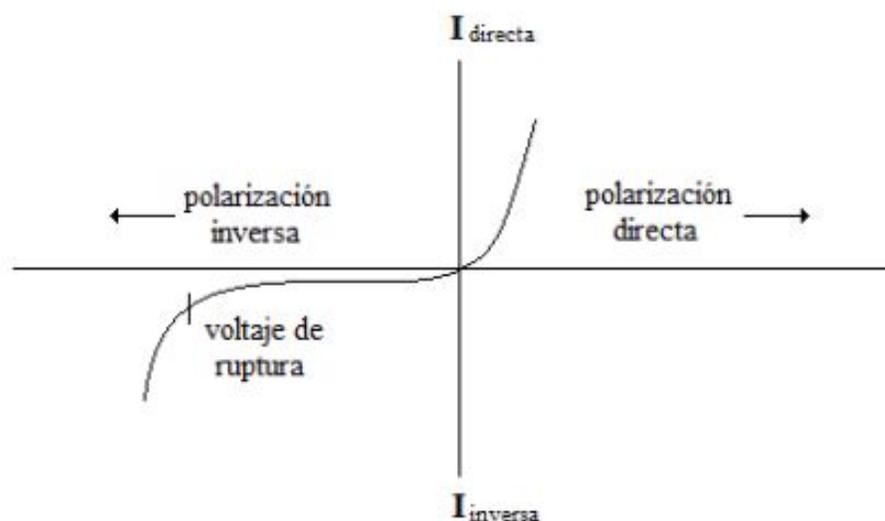


Figura 3.8: Curva característica del diodo semiconductor mostrando la polarización directa del lado derecho de la gráfica y la inversa del lado izquierdo.[Merino 2014]

3.2. Síntesis de micropartículas

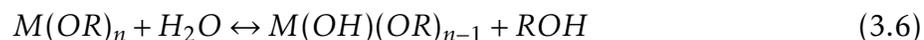
3.2.1. SOL-GEL

En los procesos de sol-gel se parte de alcóxidos metálicos y sales inorgánicas, con los cuales mediante un proceso de síntesis se obtiene un esqueleto del óxido mediante reacciones de hidrólisis y polimerización a baja temperatura. Las especiales características de la síntesis permite la producción de fibras, láminas, cadenas, partículas, geles y polímeros tridimensionales.

3.2.2. Reacciones Implicadas

Hidrólisis

Generalmente se describen dos rutas, esto dependiendo si la síntesis se llevará a cabo en fase acuosa o en fase orgánica. Para fines de este documento nos enfocaremos en la fase orgánica, ya que utilizaremos como precursor Tetraetil Ortosilicato (TEOS) y la hidrólisis se obtendrá a partir de la hidroxilación del alcóxido en este caso TEOS vía hidrólisis por adición de agua cuya reacción se representa de forma general en la ecuación 3.6.



O visto de una manera más gráfica en la figura 3.9 donde se muestra el mecanismo de reacción paso a paso utilizando el precursor TEOS.

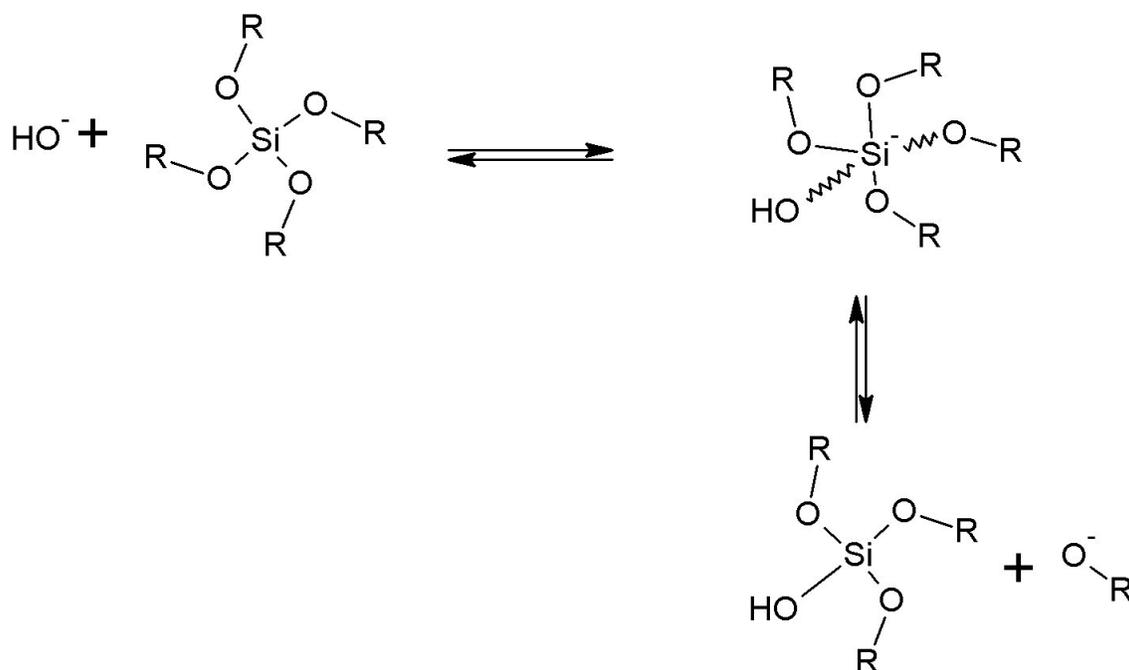


Figura 3.9: Mecanismo de reacción de hidrolización con respecto al precursor TEOS.

Condensación

A la hidroxilación le sigue un proceso de policondensación que conduce a la eliminación de moléculas de agua o alcohol, mediante procesos de olación (formación de puentes OH) u oxolación (formación de puentes de oxígeno).

Según [Iler1979], la condensación toma lugar cuando se maximiza el número de $O-Si-O$ y se minimiza el número de hidroxilo por una condensación interna. La adición de monómeros, forma anillos y estos a su vez comienzan a preceder a partículas tridimensionales, estas partículas se condensan en una forma compacta en la que los grupos hidroxilo apuntan hacia afuera y son los núcleos de crecimiento del polímero. El crecimiento se detiene cuando la diferencia en solubilidad entre partículas pequeñas y partículas grandes es solo de unas ppm.

El mecanismo de reacción se puede observar detalladamente de la siguiente manera:

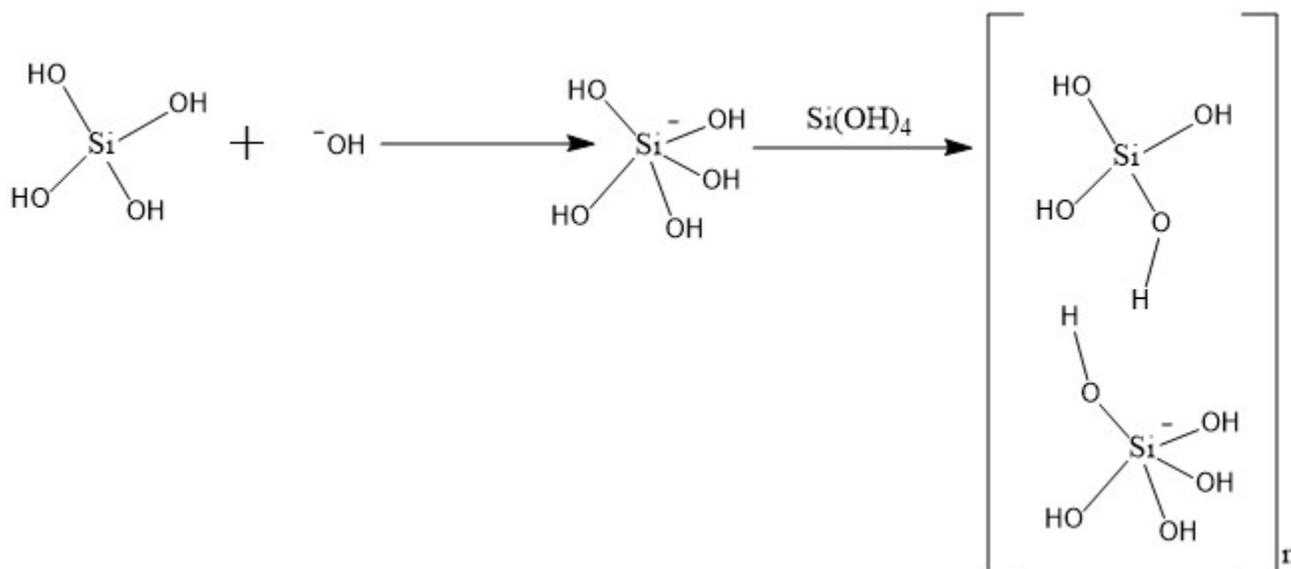


Figura 3.10: Mecanismo de reacción para la etapa inicial de condensación.

En la figura 3.10 se muestra que cuando una molécula saturada se encuentra con una molécula con exceso de grupos hidroxilo, las interacciones nucleofílicas entran en acción realizando una dimerización uniendo ambas moléculas.

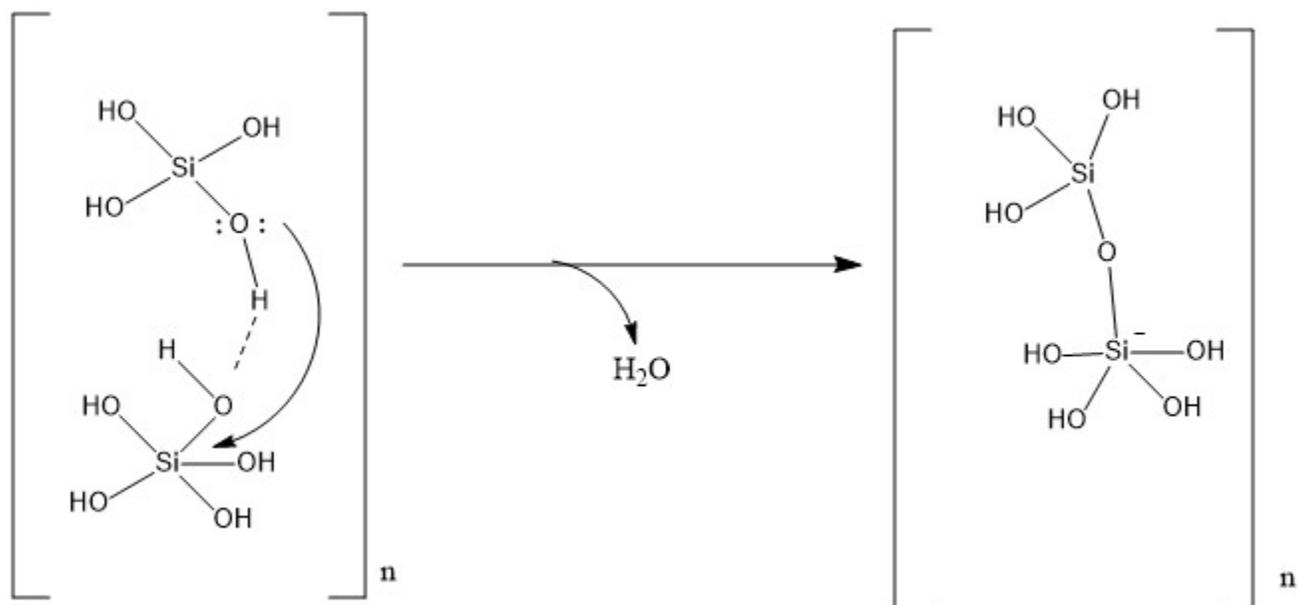


Figura 3.11: Etapa de polimerización durante la reacción de condensación.

Posteriormente se efectúa una polimerización con la participación de las nuevas moléculas de $\text{Si}(\text{OH})_4$ donde se presenta una pérdida de una molécula de agua debido a la inestabilidad de estos enlaces, hasta obtener una molécula eléctricamente neutra (fig. 3.11).

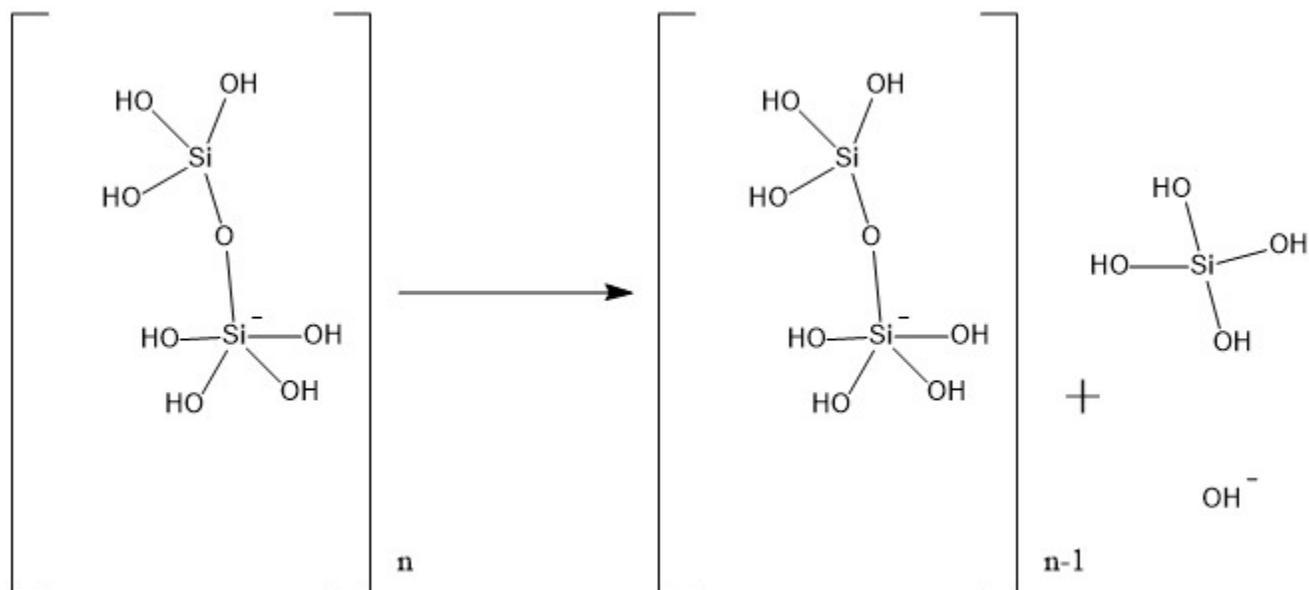


Figura 3.12: Etapa final de la reacción de polimerización.

Por último, (fig. 3.12) el proceso se repite " n " cantidad de veces hasta formar una cadena que se observara como una partícula esférica.

Metodología

En este capítulo se dará una explicación detallada de como producir los diferentes óxidos metálicos, la elaboración del prototipo de celda, la síntesis de micropartículas, depósito de micropartículas sobre la superficie de la celda, así como diferentes formas de cuantificar las celdas con y sin micropartículas tomando en cuenta tanto su capacidad de producir energía como sus capacidades ópticas.

4.1. Celda solar de óxidos de cobre y zinc

Para esta tesis se optó por realizar celdas solares específicamente con óxidos de cobre como material semiconductor tipo (p) y óxido de zinc como material semiconductor tipo (n), debido a que ya se ha demostrado que la junta de estos en presencia de un campo electromagnético produce un material óptimo para ser utilizado como celda solar [Fujimoto2013], además de que estos materiales son de bajo costo y fácil acceso, sobre todo por su disponibilidad y baja toxicidad.

4.1.1. Oxidación del cobre

A partir de una lámina de cobre de 3mm de espesor se cortaron sustratos con dimensiones de $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Los sustratos de cobre fueron sometidos a un tren de tratamiento, el cual busca eliminar la mayor cantidad de materia orgánica y suciedad que pudieran contener las láminas previamente cortadas, además de grasa de las manos y otros contaminantes. Para el tratamiento:

- Se pulieron los sustratos con ayuda de una lija de calibre 200 para eliminar la capa de barniz o aleación que se utiliza desde fábrica para evitar la oxidación del material, posteriormente se pasó a una lija de mayor calibre como 360, esto para dejar la superficie lo más uniforme posible.
- Se limpiaron los sustratos de forma manual utilizando guantes y la ayuda de un hisopo de algodón empapado en una solución de 5 gotas de jabón Extrain® en 10 mL de agua.

- Se preparó una solución 1:10 de ácido clorhídrico (HCl) concentrado al 36%. Se usa este ácido debido a que a diferencia del ácido nítrico (HNO₃) tiene menos afinidad con el cobre, por lo que no reacciona tan fácil a tiempos cortos.
- Se introdujeron los sustratos en la solución de HCl y se dejaron reposando un periodo de 5 min.
- Con ayuda de una piseta con agua destilada se limpiaron los sustratos aplicando un chorro sobre la superficie del sustratos retirando el excedente de HCl.
- Los sustratos se sumergieron en 20 mL de etanol al 90% durante 20 minutos.
- Desde este punto se realizaron tres diferentes formas para producir la oxidación:
 1. Se introdujeron los sustratos secos a un horno durante 50 min a 600°C.
 2. Se dejaron reposando los sustratos en una solución salina, preparada con 0.5g de NaCl en 20 mL de agua, durante dos días.
 3. Se realizó un electrodepósito utilizando diferentes medios conductores como lo es la solución salina del método anterior.

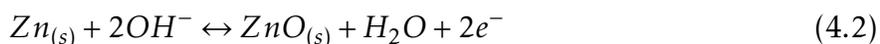
Con lo anterior se buscó que la oxidación en la superficie fuera lo más homogénea y óptima para obtener los diferentes tipos de óxido de cobre, ya que se caracterizó tanto el Cu₂O como el CuO, con lo que se determinó cual se desempeñó como mejor semiconductor para armar una celda solar.

4.1.2. Oxidación del zinc a partir de electrodepósito

Para la oxidación del zinc por electrodepósito se utilizó como precursor el acetato de zinc el cuál se colocó en un medio conductor y se procedió con el electrodepósito sobre la superficie del vidrio ITO.

Con ayuda del diagrama de Pourbaix del Zinc a 25°C en agua, figura 4.1 se establecieron las condiciones a las cuales se debe realizar el experimento; donde se controló el pH y el potencial eléctrico, este último con ayuda de una fuente de poder.

Como se puede observar en la figura 4.1 los pH para poder trabajar y oxidar al zinc es un intervalo entre 0 y 9 en la escala de pH, y un potencial entre -1 y 2 V_(ENH) por lo que resultó fácil oxidarlo a condiciones de laboratorio. Se preparó una solución básica con 0.5 mL de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M para obtener un pH 9. A la solución del punto anterior se le adicionó 0.33 g de acetato de zinc ((CH₃COO)₂Zn) para obtener una solución 0.001M que sirvió como precursor del óxido de zinc, produciendo las siguientes semirreacciones[CanizaresMacias2009]:



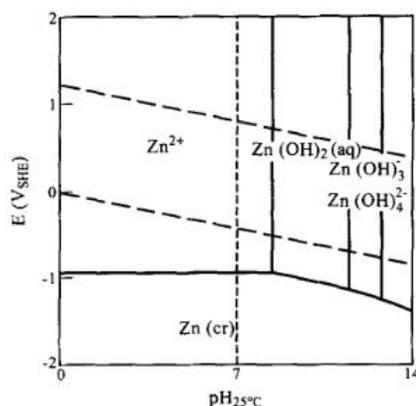


Figura 4.1: Diagrama de Pourbaix del zinc en agua a 25°C. [Beverkog1997]



Al restar la semirreacción 4.1 de la 4.2 se observa que los productos finales es una ecuación balanceada en carga y moles reacción 4.3.

4.1.3. Preparación de pasta de óxido de zinc

El óxido de zinc, al ser un material de fácil acceso se puede optar por adquirirlo mediante algún proveedor y posteriormente preparar una mezcla (pasta) que al finalizar el proceso de secado funcionará como material semiconductor.

Para la preparación se siguió el siguiente procedimiento:

- Se prepararon 40mL de solución 75% alcohol-agua en un vaso de precipitados de 50mL.
- En un vaso de precipitados previamente tarado en una balanza analítica se adicionaron 6g de ZnO Sigma-Aldrich (alta pureza).
- Se utilizó una pipeta beral con la que se fueron agregando gota a gota 15 gotas de la solución alcohol-agua y se mezcló hasta homogeneizar la mezcla.
- La mezcla se incorporó con ayuda de una espátula plana hasta obtener una consistencia pastosa tipo yeso.

Nota: Como prueba la pasta debe ser lo suficientemente viscosa para quedarse adherida a la espátula por si sola.

- La mezcla se expandió sobre la superficie del sustrato de óxido de cobre.
- Con ayuda de una parrilla a 60°C se dejó secar durante 10 min.

4.1.4. Preparación de la celda solar

A partir de los materiales previamente obtenidos en las secciones 4.1.1 y 4.1.3 se efectuó el prototipo de una celda solar a partir de un arreglo tipo *sándwich* utilizando el siguiente procedimiento.

- Se lijó una cara del sustrato de cobre previamente oxidado y en la cara oxidada se aplicó directamente una capa de la pasta de óxido de zinc del capítulo 4.1.3; ésta se expandió con ayuda de la pala plana hasta quedar distribuida uniformemente en la superficie.
- Utilizando una tira de cobre de aproximadamente 0.5mm de espesor se realizó un contacto entre la cara del cobre pulido y la tira, utilizando un vidrio portaobjetos para aislar el sistema.
- El vidrio ITO, se colocó sobre la superficie del óxido de zinc y se fijó utilizando sujetadores de documentos como se muestra en la figura 4.2

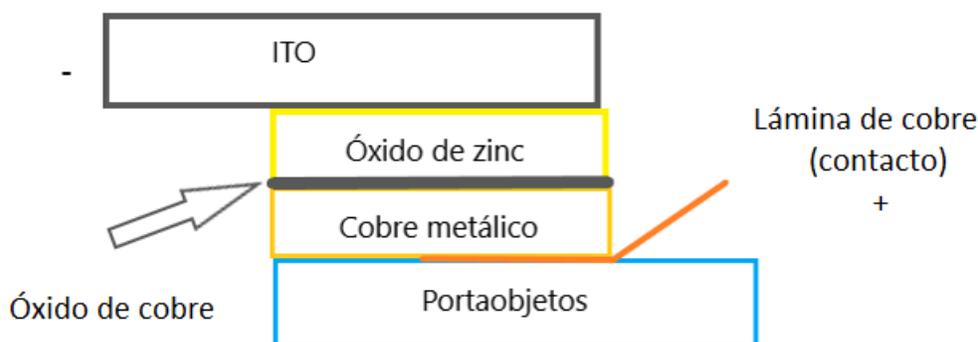


Figura 4.2: Esquema del arreglo tipo *sándwich* de una celda solar de semiconductores n-p.

4.2. Depósito de micropartículas

4.2.1. Limpieza de sustratos

Para poder realizar un depósito de micropartículas en diferentes sustratos como lo es vidrio, cuarzo y silicio de alta pureza, se requiere de un procedimiento de limpieza que busca eliminar toda la materia orgánica residual y además promover una superficie hidrofóbica para la mejor dispersión y arreglos más ordenados en la superficie de los sustratos, para esto se realiza una solución piranha y un tratamiento de almacenaje a los diversos sustratos. El procedimiento que se siguió fue:

- Los sustratos utilizados fueron: cuarzo, silicio y vidrio; se utilizaron pañuelos para superficies delicadas KIMTECH SCIENCE BRAND para remover la suciedad que pudiera estar sobre el sustrato.
- Para su limpieza se realizó una reacción piranha donde en un vaso de precipitados de 150 mL se vertieron 9 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado Sigma-Aldrich y se procedió a ponerlo en agitación a 250 rpm con ayuda de un agitador magnético y una parrilla de agitación con opción de control de temperatura.
- Se elevó la temperatura del H_2SO_4 a $80^\circ C$.
- Una vez que se alcanzó la temperatura de $80^\circ C$ se vertieron 3 mL de H_2O_2 en un vaso de precipitados de 10 mL.

Nota: Si se prepara el H_2O_2 antes de que el ácido esté caliente, se corre el riesgo de perder el peróxido y que la piranha no dé los resultados esperados.

- Al ácido se le fue agregando gota a gota el H_2O_2 para evitar proyecciones y otros posibles riesgos. Nota: Un indicador de que se está preparando correctamente, es que la solución empezará a efervescer.
- Una vez terminado el proceso de goteo se procedió a agregar los sustratos a la piranha; es recomendable no exceder de 5 a 8 sustratos dentro de la solución, ya que de otra forma puede que no se limpien adecuadamente.
- Se dejó la solución junto con los sustratos en agitación constante a $100^\circ C$ durante 20 minutos.
- Una vez que transcurrieron 20 minutos a $100^\circ C$ se procedió a apagar el control de temperatura y se dejó reposar la solución hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Una vez limpios los sustratos se realizó un tren de tratamiento para eliminar los residuos de la solución piranha y preparar la superficie hidrofóbica; para esto:

- Se realizaron tres baños utilizando agua destilada; en los cuales se agregó el agua con ayuda de una piseta y se les hizo un enjuague manualmente.

- De la misma manera se realizaron tres enjuagues con alcohol etílico de alta pureza para eliminar la humedad y se dejaron los sustratos reposando en el último baño de alcohol.

4.2.2. Síntesis de micropartículas

Este procedimiento es sumamente sensible a condiciones del medio ambiente, por lo que se debe controlar lo mejor posible. Para esto se requiere de un sistema de aire acondicionado donde se pueda mantener una temperatura de (15-18)°C las condiciones de la síntesis se proponen a partir de un trabajo previo, donde se determinó que la hidrólisis es una reacción exotérmica y la condensación una reacción endotérmica, [Luna, Zarate, Flores 2018].

- Se montó un sistema utilizando un intercambiador de calor de serpentín y agua con hielo a una temperatura aproximada de 6°C.
- Se midieron 20 mL de etanol que se agregaron a un vaso de precipitados de 150 mL y se puso en agitación a 200 rpm. Este vaso se rodeó con el serpentín y se prendió una bomba tipo pecera, la cual hizo circular agua a 6°C en los bordes del vaso de precipitados de tal forma que el etanol llegó al equilibrio térmico con el agua. figura 4.3.
- Al etanol en agitación se agregaron 1.8 mL de TEOS (Tetraetilortosilicato) a esta solución la llamamos solución (1).
- En un vaso de 20 mL se depositaron 8 mL de agua destilada y 5.5 mL de NH_4OH a esta mezcla la llamamos solución (2).

Nota: Se dejó enfriando la solución (1) hasta alcanzar 12°C; durante este tiempo se realizó la solución (2).

- Una vez que se alcanzaron los 12°C en solución (1), se enfrió la solución (2) rápidamente a baño María hasta igualar la temperatura de la solución (1), se retiró el serpentín y se procedió a hacer la reacción antes de que cualquiera de las soluciones se calentará.
- Se agregó la solución (2) a la solución (1) gota a gota a un flujo constante de 30 gotas por minuto, ya que de otra manera no se obtendrán partículas esféricas. La solución cambió de un color traslucido a un blanco lechoso a medida que se iba avanzando la reacción, esto es un buen indicador de que la reacción está llevándose con normalidad.
- Se dejó la síntesis en agitación magnética durante 120 minutos de tal manera que concluyera la reacción y se estabilice con el ambiente.

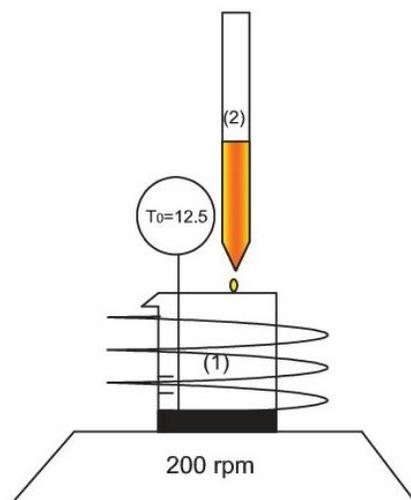


Figura 4.3: Esquema de preparación de síntesis usando un enfriador de serpentín.

4.2.3. Depósito de micropartículas

Los sustratos previamente preparados en el capítulo 4.2.1 se utilizaron para realizar el depósito de micropartículas mediante la técnica de spin-coating, figura 4.4, esta consiste en dos etapas, la primera utiliza la fuerza centrífuga generada por la velocidad de giro para dispersar de forma homogénea la emulsión sobre el sustrato y la segunda se utilizó para secar el disolvente de la muestra; para esto:

- Se accionaron dos bombas para implementar un vacío que servirá para hacer succión en la muestra a depositar, la primer bomba es una bomba mecánica que se usó para generar la mayor fuerza de vacío y la segunda es una bomba turbomolecular que se utilizó para evitar daños en el equipo funcionando como un amortiguador.
- Se extrajo un sustrato del etanol y se procedió a secar con una pistola de aire y un pañuelo KIMTECH SCIENCE®.
- Se colocó el sustrato en la ranura correspondiente del spin-coater, y se programó la velocidad de spin, así como el tiempo deseado.
- Con ayuda de una micropipeta se tomó un volumen determinado y se procedió a verter la gota en el centro del sustrato.
- Por último se accionó el spin coater.
- Se repitieron los dos últimos pasos para la etapa de secado.

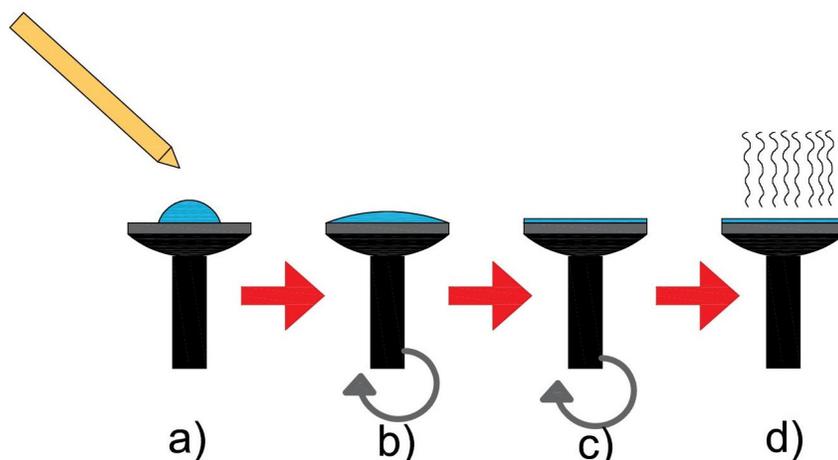


Figura 4.4: Proceso de spin-coating para obtener una película delgada. a) Depósito de una gota de emulsión de micropartículas. b) Eliminación del exceso de solución. c) Formación de una película delgada. d) Evaporación del exceso de disolvente.

4.3. Caracterización de micropartículas

Para caracterizar la calidad del depósito de las micropartículas se recurrió a un análisis de la superficie utilizando microscopio electrónico de barrido SEM. El instituto de Física de la UNAM tiene a disposición microscopio electrónico SEM 7800, el cual nos mostrará imágenes definidas de cómo se ven las partículas, su acomodo y con ayuda de otras herramientas de cómputo su tamaño y distribución.

4.4. Caracterización de celdas solares

4.4.1. Potencial eléctrico

Se midió el potencial eléctrico generado por la celda con ayuda de un multímetro Fluke 875 y una lámpara de luz UV y blanca Steren SEG050 en diferentes condiciones:

1. Cuarto oscuro con lámpara UV; Se utilizó una sala completamente a oscuras buscando eliminar todas las fuentes de luz utilizando un haz de luz ultravioleta intercalando entre la luz y la oscuridad.
2. Cuarto oscuro con luz blanca; Se utilizó una sala completamente a oscuras buscando eliminar todas las fuentes de luz utilizando un haz de luz blanca intercalando entre la luz y la oscuridad.

Además, se variaron los diferentes óxidos de cobre obtenidos en el capítulo 4.1.1 en las condiciones antes mencionadas.

4.4.2. Curvas de reflectancia

Se realizó un arreglo utilizando una fuente de luz dirigida con ayuda de una fibra óptica de 600 nm y registrando los datos en una computadora utilizando un espectrofotómetro Ocean Optics USB-4000 como se muestra en la figura 4.5.

Se colocaron los sustrato en el soporte y se graficaron las curvas de reflectancia a partir de los datos obtenidos.

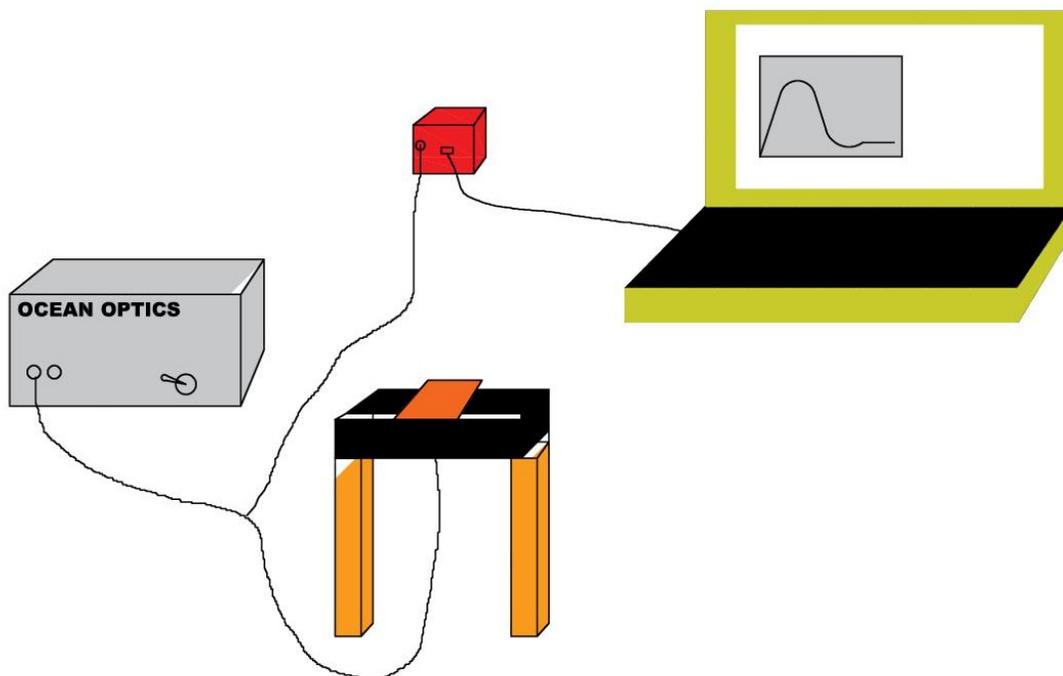


Figura 4.5: Arreglo del espectrofotómetro

4.4.3. Curvas de transmitancia

Para poder evaluar la posibilidad de utilizar micropartículas en las celdas se utilizaron diferentes técnicas para medir la diferencia de las capacidades ópticas de la celda, en este caso la transmitancia de la luz a través del material. Este se midió utilizando un diferente arreglo al del espectro de reflectancia de la sección 4.4.2; en donde se requirió una fuente de luz blanca y un arreglo alineado con una lente que emitía luz y otra que la recibió cuantificando esta última en un espectrofotómetro de la marca Ocean Optics USB-4000 como se muestra en la figura 4.6.

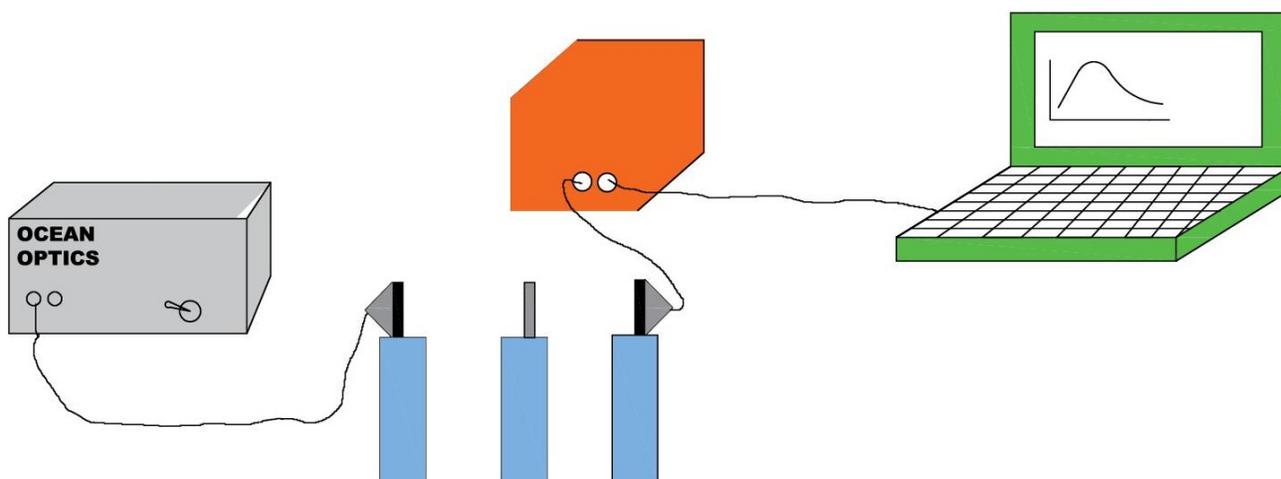


Figura 4.6: Arreglo para medición de transmitancia

4.4.4. Curvas de Polarización

Para las curvas de polarización se utilizaron los conceptos básicos del capítulo 3.1.12 por lo que se hicieron los arreglos para poder obtener las curvas de polarización directa y polarización inversa, utilizando una fuente de poder Kaise SK-8092, con la que se aplicó una diferencia de potencial en la celda produciendo una corriente eléctrica, utilizando estos datos se construyeron las gráficas de corriente vs potencial eléctrico. El arreglo que se utilizó en la celda para cerrar el sistema se muestra en la figura 4.7

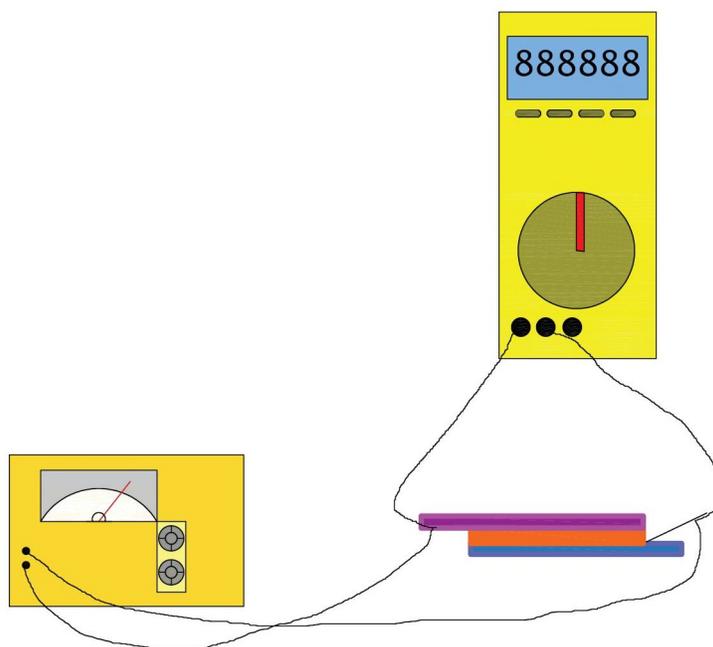


Figura 4.7: Arreglo utilizando una fuente de poder y un multímetro para obtener la curva de polarización.

Resultados y análisis

5.1. Sustratos producto de la Oxidación del Cobre

Siguiendo la metodología que se planteó en el la sección 4.1.1, en donde se busca obtener la oxidación de láminas de cobre a partir de tres metodologías diferentes:

1. Por calentamiento.
2. Por proceso electroquímico
3. Por baño químico.

En la imagen 5.1 se muestran 4 formas del cobre oxidado, las muestras 1 y 2 son de láminas de cobre que fueron oxidadas en un horno a 600°C, en este proceso se obtienen ambas presentaciones de óxido de cobre, en la imagen 1 se observa el Cu_2O de color rojizo y el CuO de color negro presente en la imagen 2.

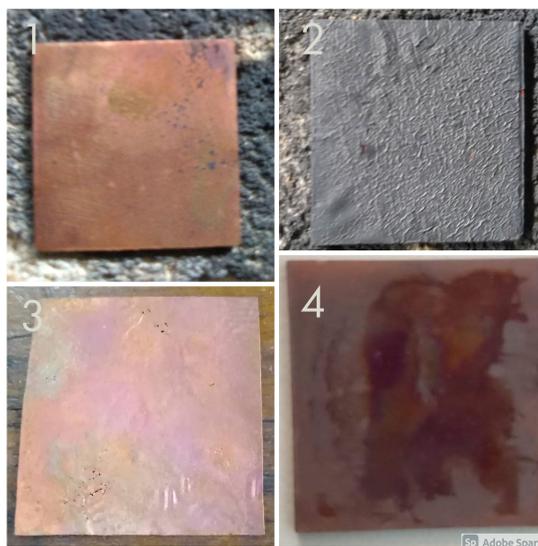


Figura 5.1: Formas de la oxidación del cobre en procesos diferentes.

Las muestras 1 y 2 son resultado del mismo proceso utilizando un horno, sin embargo, el CuO es más quebradizo y menos manipulable, preparado de esta forma presentándose en forma de laja en la parte superior expuesta para trabajar con el Cu₂O solo es cuestión de retirar la laja de la superficie con cuidado para no gastar la parte inferior.

La muestra 3 es el resultado del reposo del sustrato en la solución salina y el sustrato 4 es producto de la misma solución salina pero acelerada por medio de electrodeposición.

Con estos resultados se puede observar que la muestra que presenta una oxidación más homogénea es la que se realiza por medio de calentamiento, ya que además de conseguir ambos óxidos éstos se observan de forma mayoritaria en la superficie de la muestra de cobre, aunque químicamente ambos estén presentes en las fases en equilibrio. Este proceso requiere menos tiempo en comparación con el reposo en solución salina que de igual manera nos presenta un sustrato de cobre oxidado sin embargo éste solo nos ofrece de forma mayoritaria el cobre rojizo, la única desventaja de utilizar un horno es el hecho de que consume más energía que los demás métodos.

5.2. Sustratos con electrodepósito de Óxido de Zinc

El depósito en los sustratos de vidrio y de ITO fueron exitosos pero la superficie en la que está presente fue muy delgada y al momento de ensamblar la celda no generaron ninguna respuesta positiva, el depósito se puede observar en la figura 5.2 producto del electrodepósito del acetato de zinc.

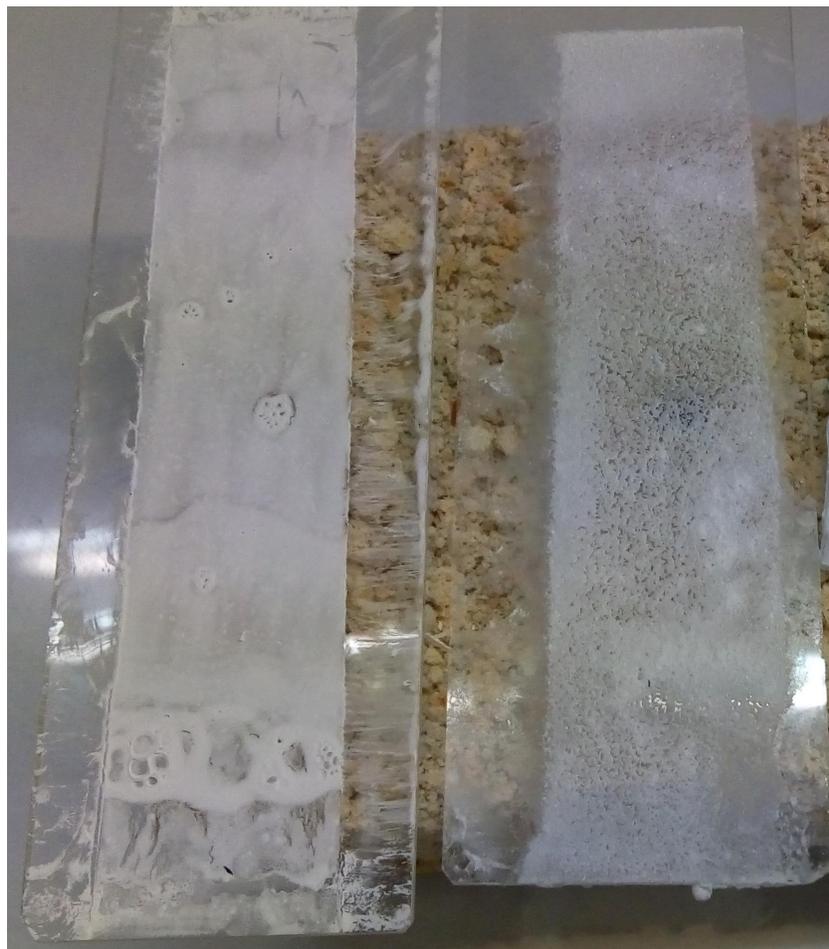


Figura 5.2: Depósito de óxido de zinc en sustratos de vidrio(derecha) e ITO (izquierda)

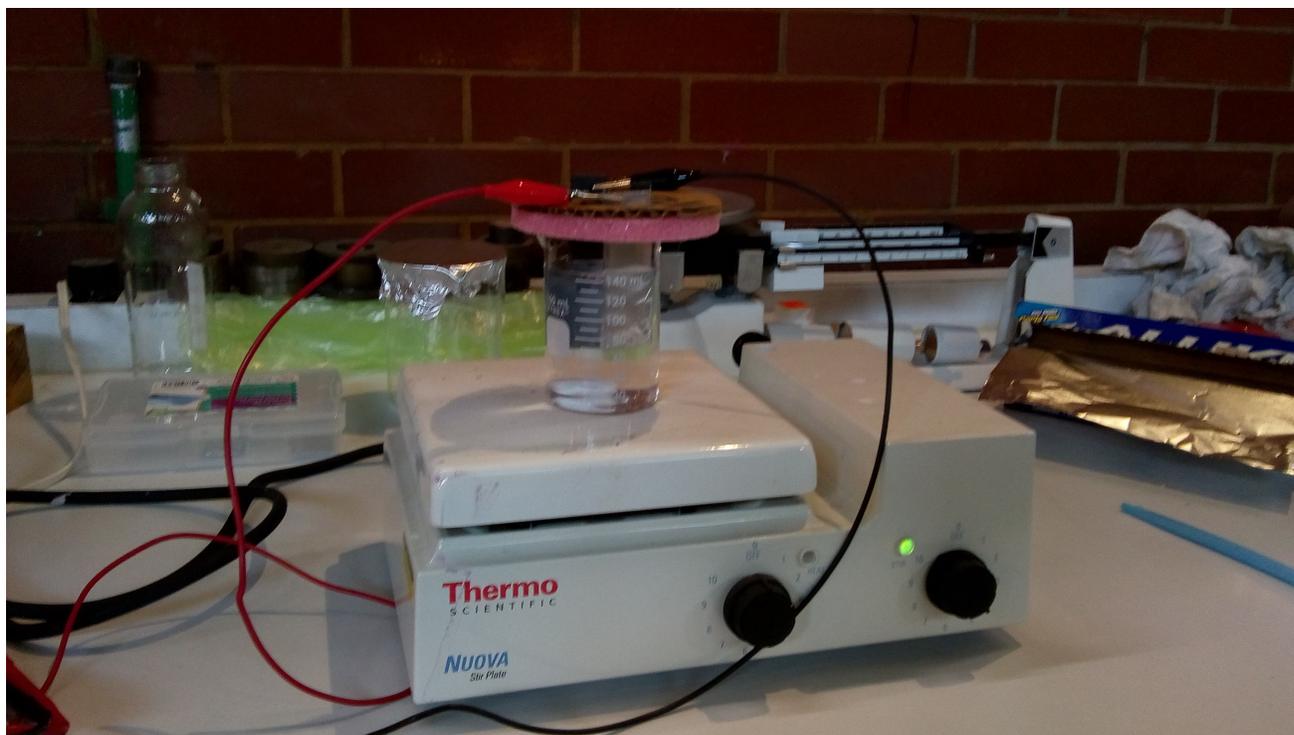


Figura 5.3: Electrodeposición de zinc en vidrio ITO a partir de acetato de zinc.

5.3. Pasta de óxido de zinc y ensamblado de celda

Utilizando la metodología de la sección 4.1.3 se encontró que la pasta de óxido de zinc es un muy buen material para realizar la junta de semiconductores n-p, lográndose ensamblar con éxito una celda solar con arreglo tipo sándwich que manda una señal favorable de potencial eléctrico, el cual fue medido con un multímetro. EL prototipo de la celda se puede observar en la figura 5.4

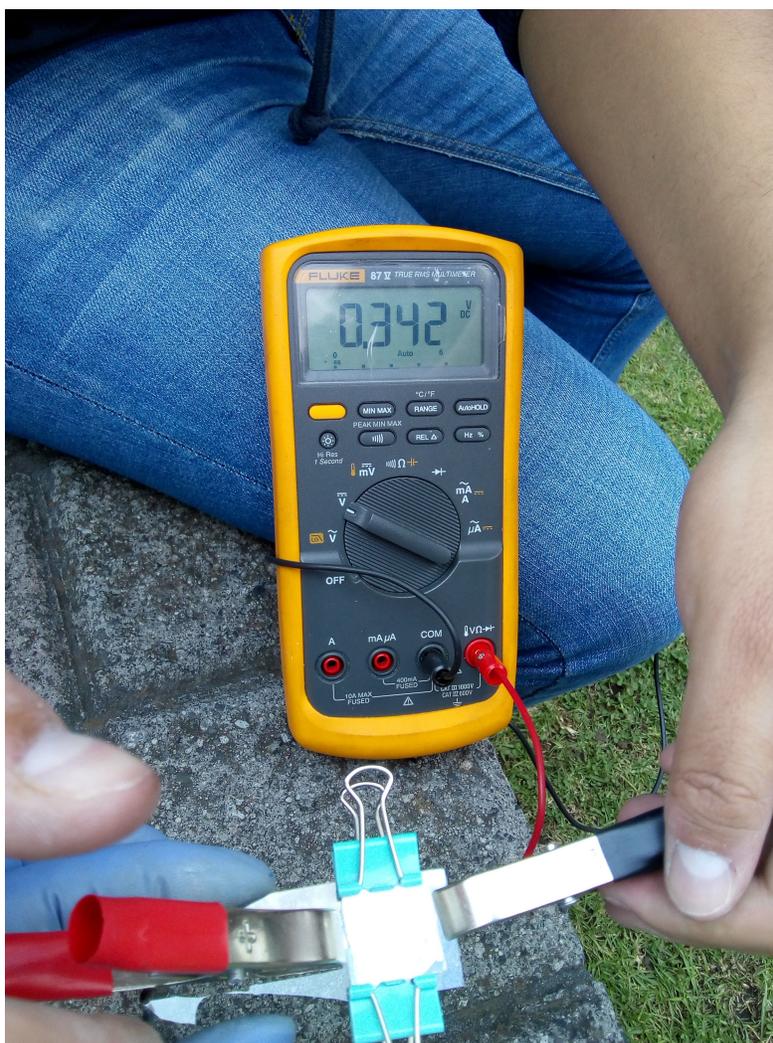


Figura 5.4: Prototipo de celda de arreglo tipo sándwich utilizando junta de semiconductores n-p

5.4. Caracterización de Potenciales Eléctricos de las Celdas Solares

Utilizando las celdas obtenidas en el capítulo 5.3, se realizó la caracterización de los potenciales eléctricos que son capaces de generar.

Se utilizaron 13 celdas solares, 4 celdas de CuO y 9 celdas de Cu₂O; todas las celdas se midieron a 25 °C de temperatura ambiente y 20 segundos de exposición a las diferentes fuentes de luz, que para fines del experimento fueron luz blanca y luz ultravioleta. El CuO de estas pruebas se realizó utilizando el procedimiento de calentamiento por un horno dejando todos los sustratos el mismo tiempo de calentamiento. El Cu₂O se obtuvo utilizando el mismo procedimiento, pero en estos sustratos se retiró la capa exterior del otro óxido para quedarnos con el óxido rojizo.

Muestra	Luz UV (mV)	Luz Blanca (mV)
1704191**	173	333
1704192**	360	200
810181	284	184
810182	323	245
810183	263	130
810184	292	430
2409181	337	171
2409182	407	260
2409183	110	20
1209181**	292	120
1209182**	189	260
180	320	160
30	58	5
(**) Muestras utilizadas para la curva de polarización		

Figura 5.5: Tabla de diferencia de potencial generado por las celdas

En la figura 5.5 se marcan en color gris las celdas que fueron fabricadas utilizando CuO. Se realizó un promedio de diferencia de potencial generado por celdas fabricadas con CuO y celdas con Cu₂O para medir su desempeño global en la figura 5.6.

	Luz UV (mV)	Luz Blanca (mV)
Promedio (CuO)	229	288
Promedio (Cu ₂ O)	277	152

Figura 5.6: Comparación de diferencia de potencial promedio de los diferentes materiales.

5.4.1. Explicación del desempeño de los Óxidos

Como se explicó en la sección 3.1.3 los materiales por naturaleza pueden ser aislantes, conductores o semiconductores. Estos últimos nos interesan ya que son los materiales de los cuales nos estamos basando para construir nuestra celda solar y esto significa que cada uno de los óxidos de cobre presenta un diferente valor en su banda prohibida y esta es la energía que requiere para que un electrón pueda ser desplazado de la banda de valencia a la banda de conducción generando un flujo de electrones. Este comportamiento puede ser descrito con la ecuación de Planck.

Dónde:

$$E = h\nu \quad (5.1)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (5.2)$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (5.3)$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} \quad (5.4)$$

En la ecuación 5.3 se describe la energía en términos de longitud de onda y despejando ésta podemos determinar la longitud de onda que describe la energía de la banda prohibida.

El óxido cuproso tiene un intervalo de banda prohibida de 2.0 eV a 2.2 eV y sustituyendo los valores en la ecuación encontramos que las longitudes de onda que describe este material se encuentran en el espectro del ultravioleta.

En el caso del óxido cúprico el intervalo de la banda prohibida está en 1.2 eV y 1.4 eV, ubicando al material en el espectro visible.

Con estos valores podemos darnos cuenta que el óxido cúprico CuO es un excelente material para la fabricación de celdas ya que aprovecha mejor la luz incidente y trabaja en todo el espectro visible.

5.4.2. Curvas de polarización

Se utilizó la metodología que se describe en el capítulo 4.4.4 utilizando la fuente de poder Kaise SK-8092 y el multímetro Fluke 875.

Como se describe en la figura 5.5 las muestras que se utilizaron para realizar la curva de polarización fueron dos muestras representativas de cada tipo de óxido de cobre; representando al CuO se utilizaron las muestras 1209182 y 1704191. Para las muestras de Cu₂O se utilizaron 1209181 y 1704192.

Curvas de polarización de Cu₂O:

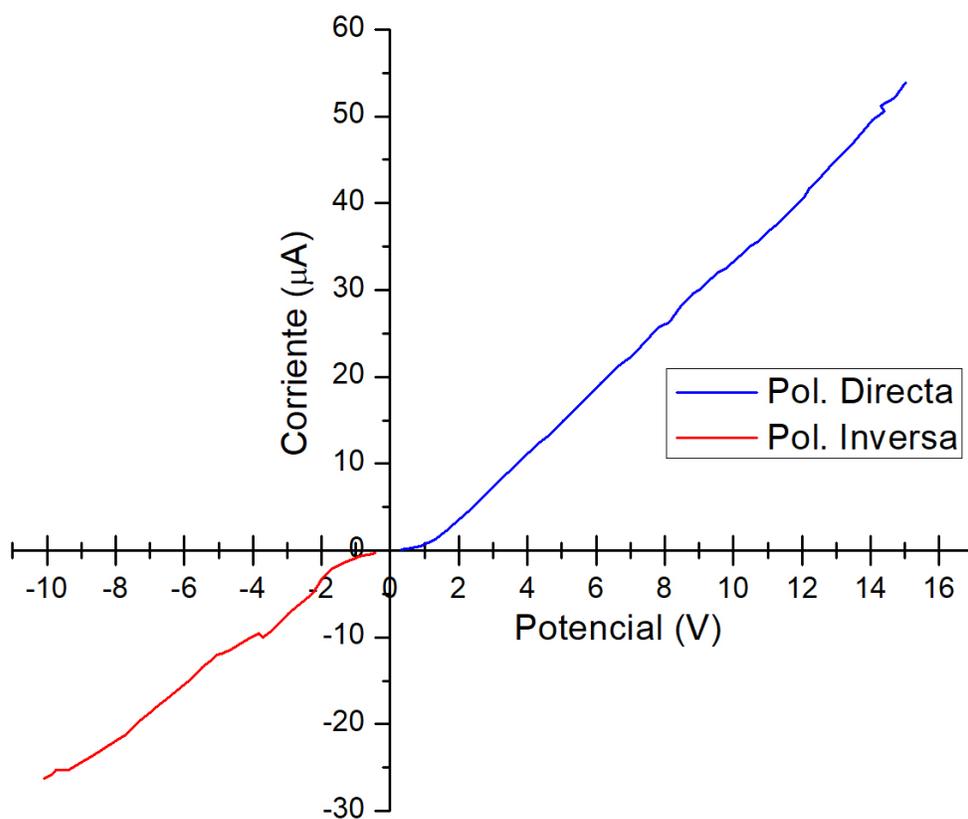


Figura 5.7: Curva de polarización de la muestra 1209181

Curvas de polarización de CuO:

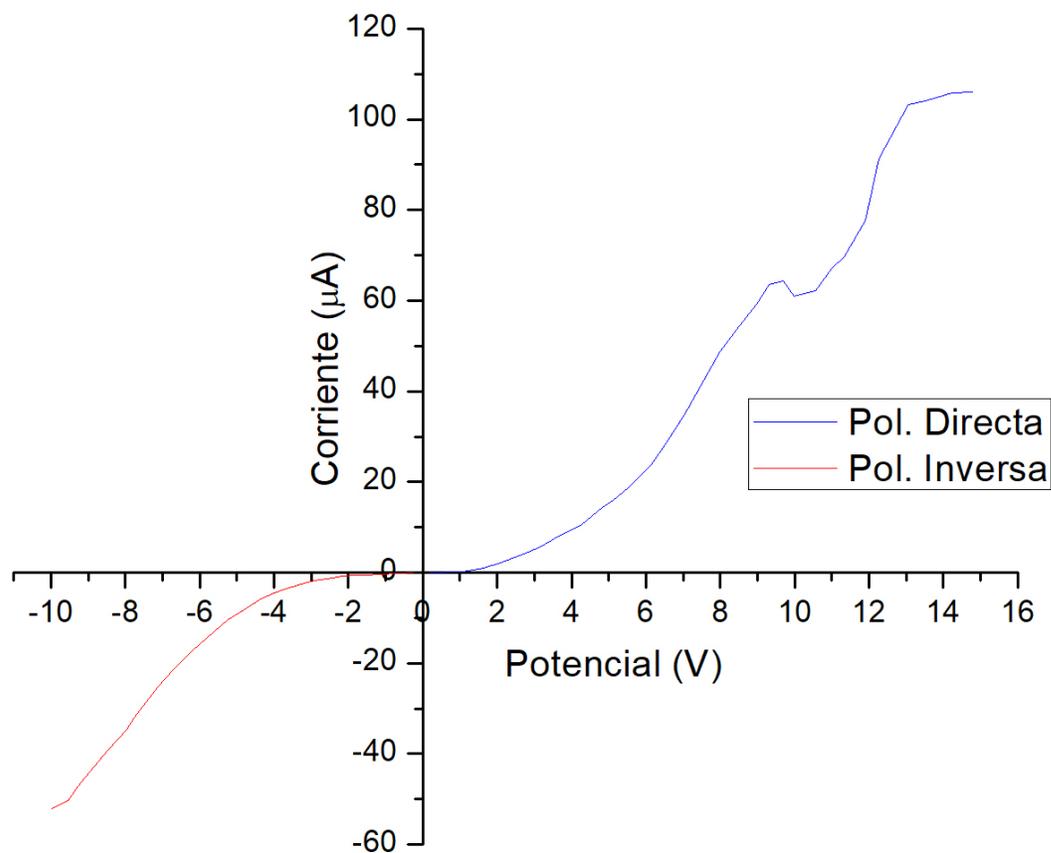


Figura 5.8: Curva de polarización de la muestra 1209182

En la figura 5.7 se observa un comportamiento lineal a diferencia del de la figura 5.8 en donde se puede apreciar el potencial de ruptura en la polarización inversa que es típica de un diodo semiconductor, por lo que podemos decir que el CuO tiene mejores resultados como diodo. También se observa que en el caso del diodo semiconductor de CuO se genera una mayor respuesta de potencial eléctrico a menor corriente aplicada.

El tener una curva que sea característica de un diodo nos muestra cual material se comporta mejor como un semiconductor, del cual se basará nuestra celda; a partir de este experimento podemos observar que el material con un mejor desempeño de diodo es el CuO .

5.4.3. Depósito de micropartículas

Las partículas sintetizadas por método sol-gel produjeron partículas esféricas como se puede apreciar en la figura 5.9 y un acomodo ordenado gracias a la técnica del spin coating.

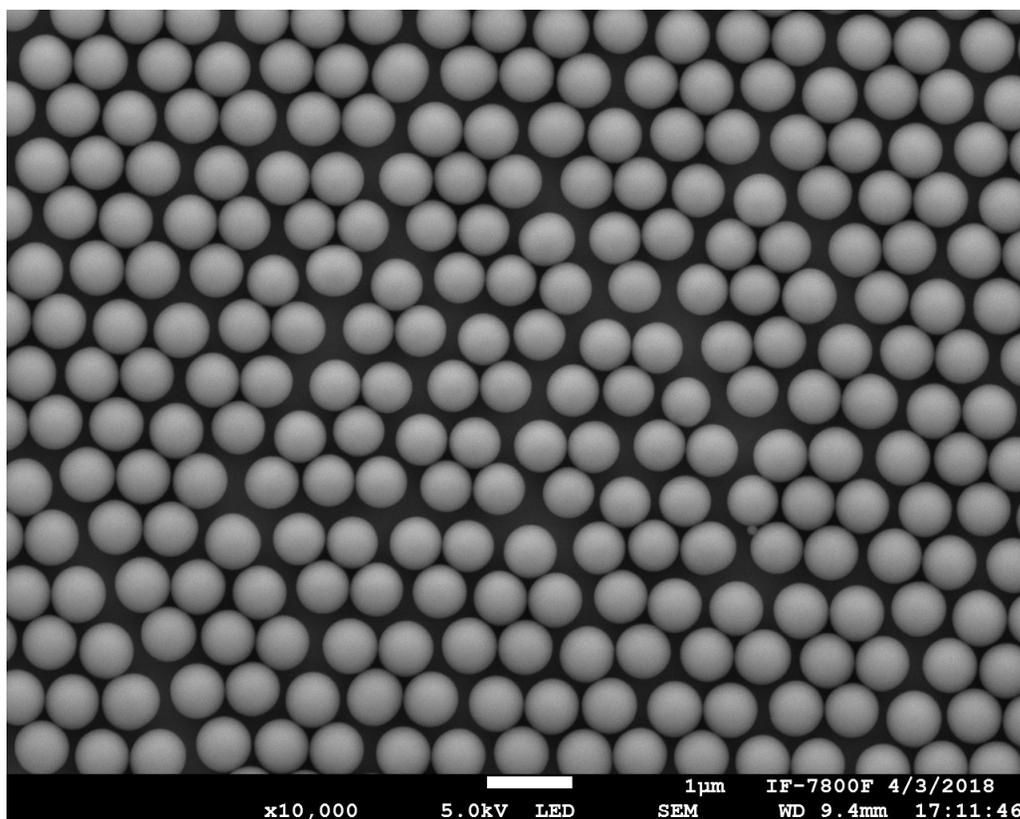


Figura 5.9: micropartículas de sílice sintetizadas por sol-gel en un vidrio ITO

Las partículas tuvieron un tamaño promedio de $0.570 \mu\text{m}$ como se muestra en la gráfica de frecuencia de tamaño de partículas 5.10.

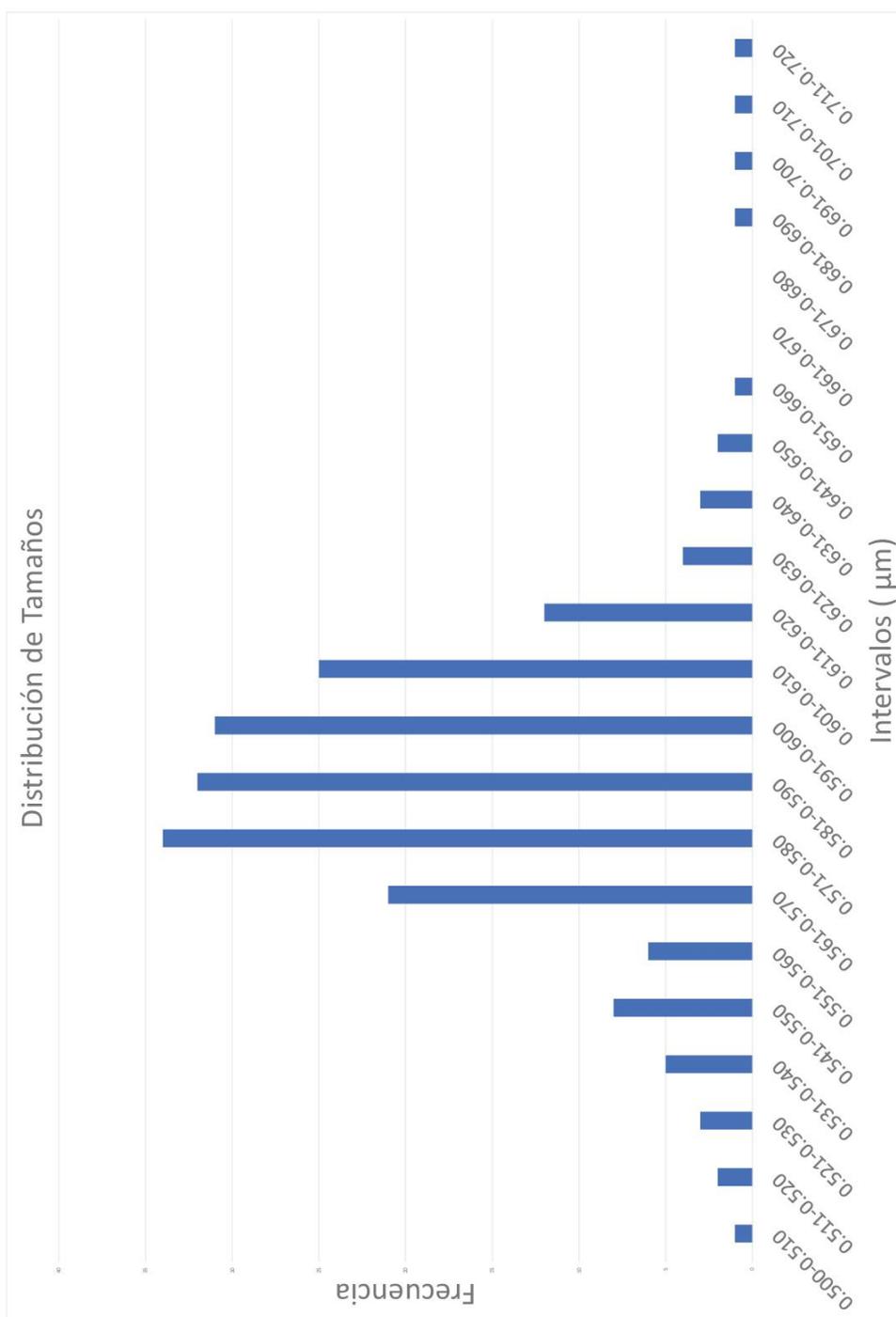


Figura 5.10: Gráfica de frecuencias de los tamaños de las micropartículas de sílice

5.4.4. Curvas de Reflectancia

Para cada material utilizado en la fabricación de la celda se obtuvo la curva de reflectancia siguiendo la metodología del capítulo 4.4.2.

Curva de reflectancia Vidrio ITO:

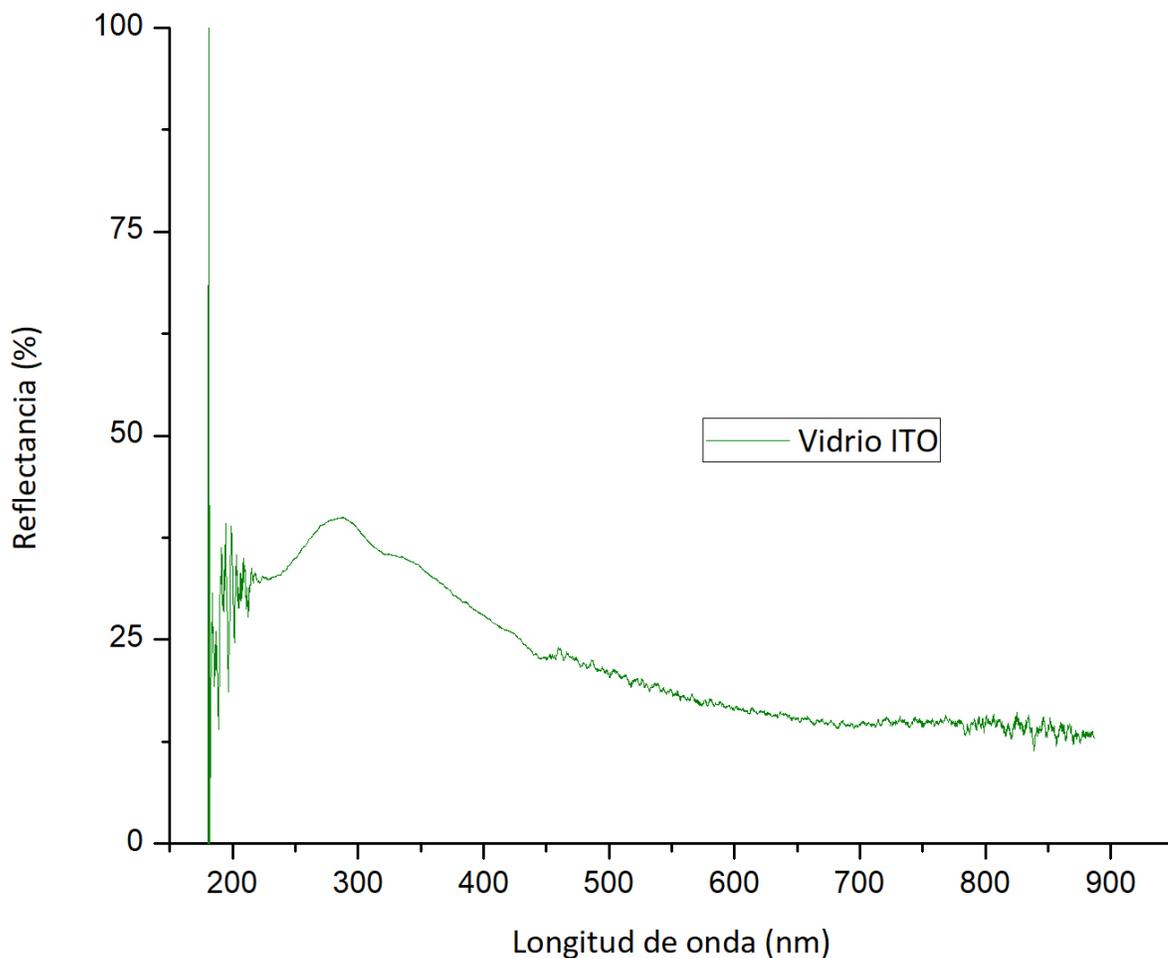


Figura 5.11: Curva de reflectancia de vidrio ITO obtenida con espectrofotómetro Ocean Optics USB-4000

En la curva (fig. 5.11) se observa que el material ITO refleja el 50% de la luz cercana a los 400 nm que correspondería al espectro UV y solo el 25% de la luz cercana al espectro infrarrojo. Por lo que este material está reflejando entre la mitad y un cuarto de la luz que incide en el vidrio.

Curva de reflectancia del cobre:

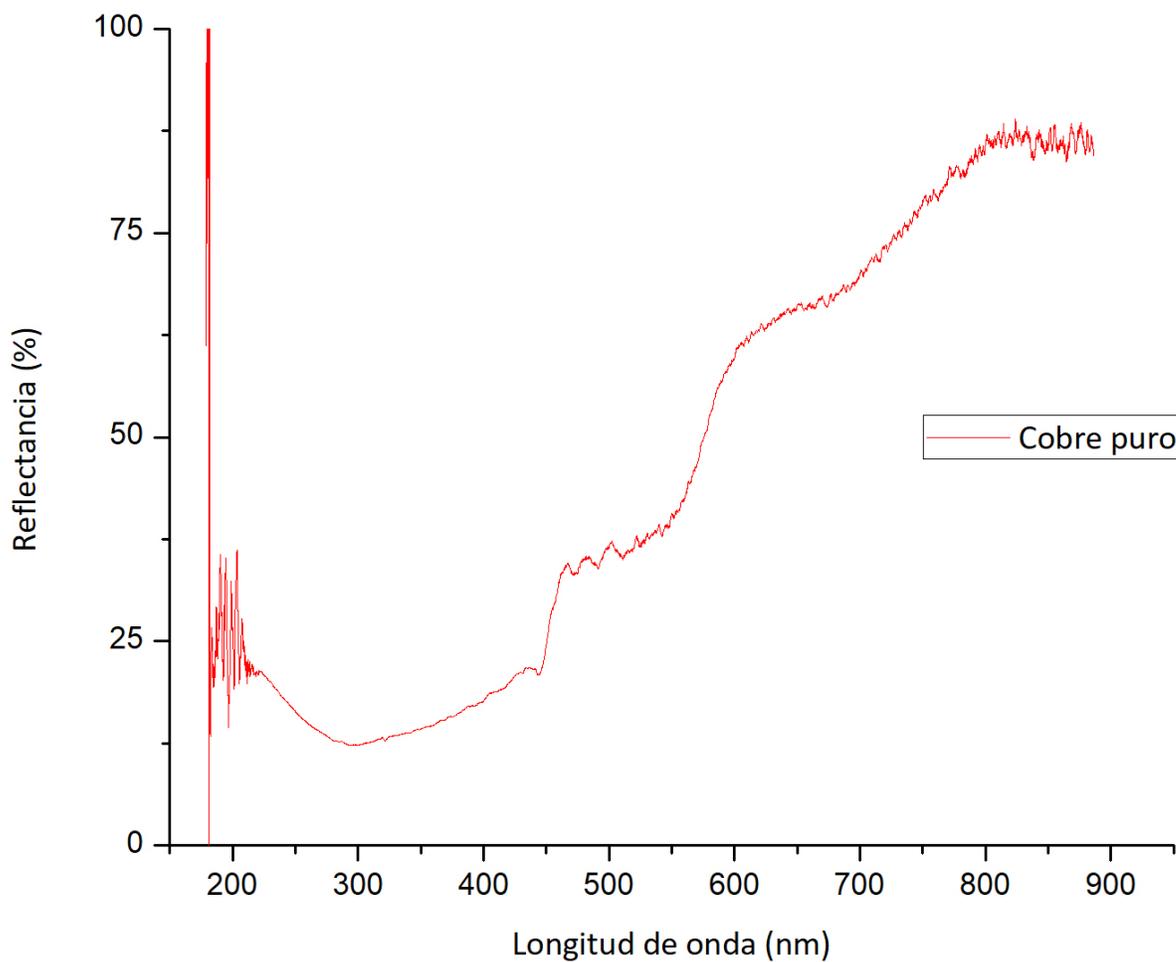


Figura 5.12: Curva de reflectancia de cobre obtenida con espectrofotómetro Ocean Optics

En el caso de la curva del cobre (fig. 5.12) se encuentra que este material refleja el 90% de la luz que incide cercana al espectro infrarrojo, pero solamente un cuarto de la luz cercana al UV.

Curva de reflectancia de ZnO:

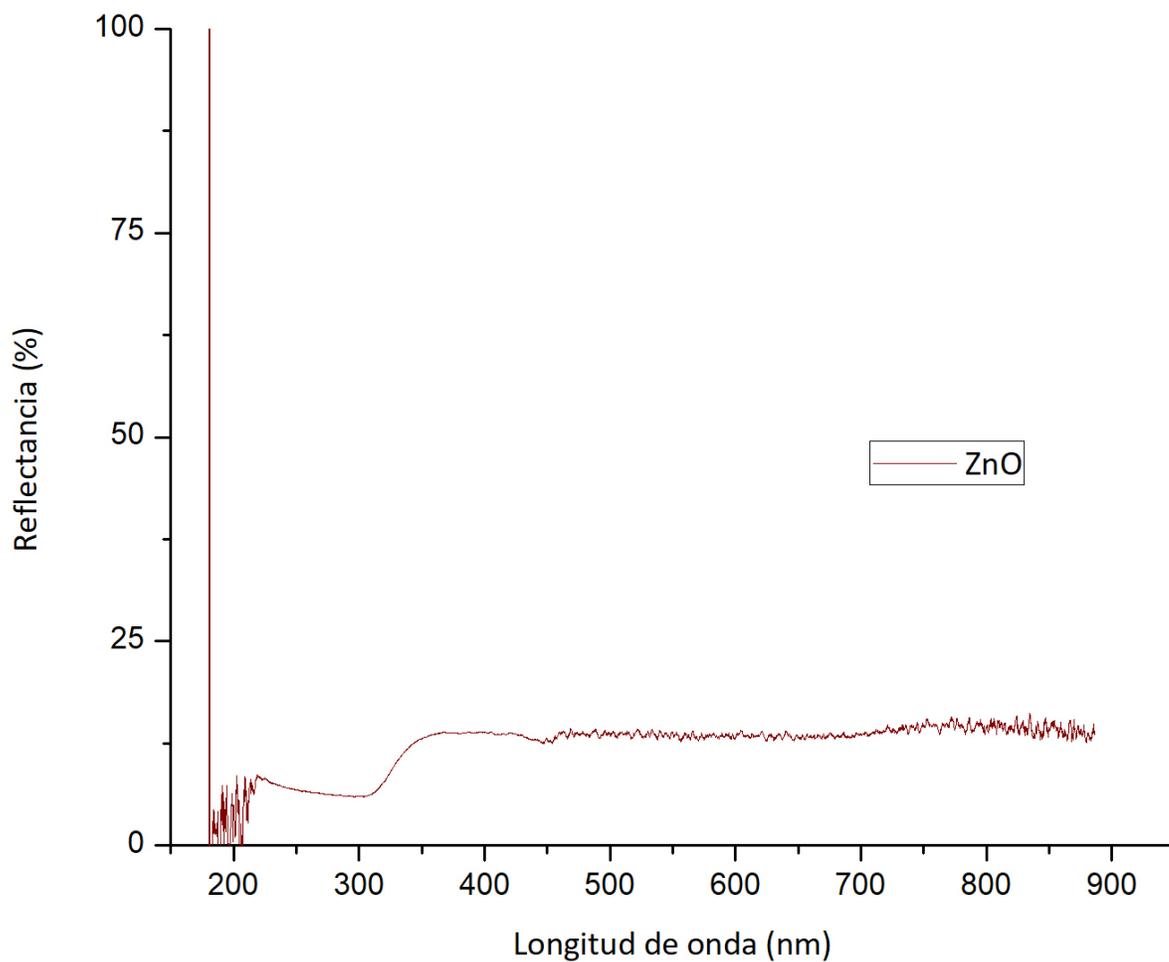


Figura 5.13: Curva de reflectancia de ZnO obtenida con espectrofotómetro Ocean Optics USB-4000

La curva del óxido de zinc muestra que este material solo refleja el 25% de la luz incidente en ambos extremos del espectro de luz.

Curva de reflectancia de Óxido de Cobre (I):

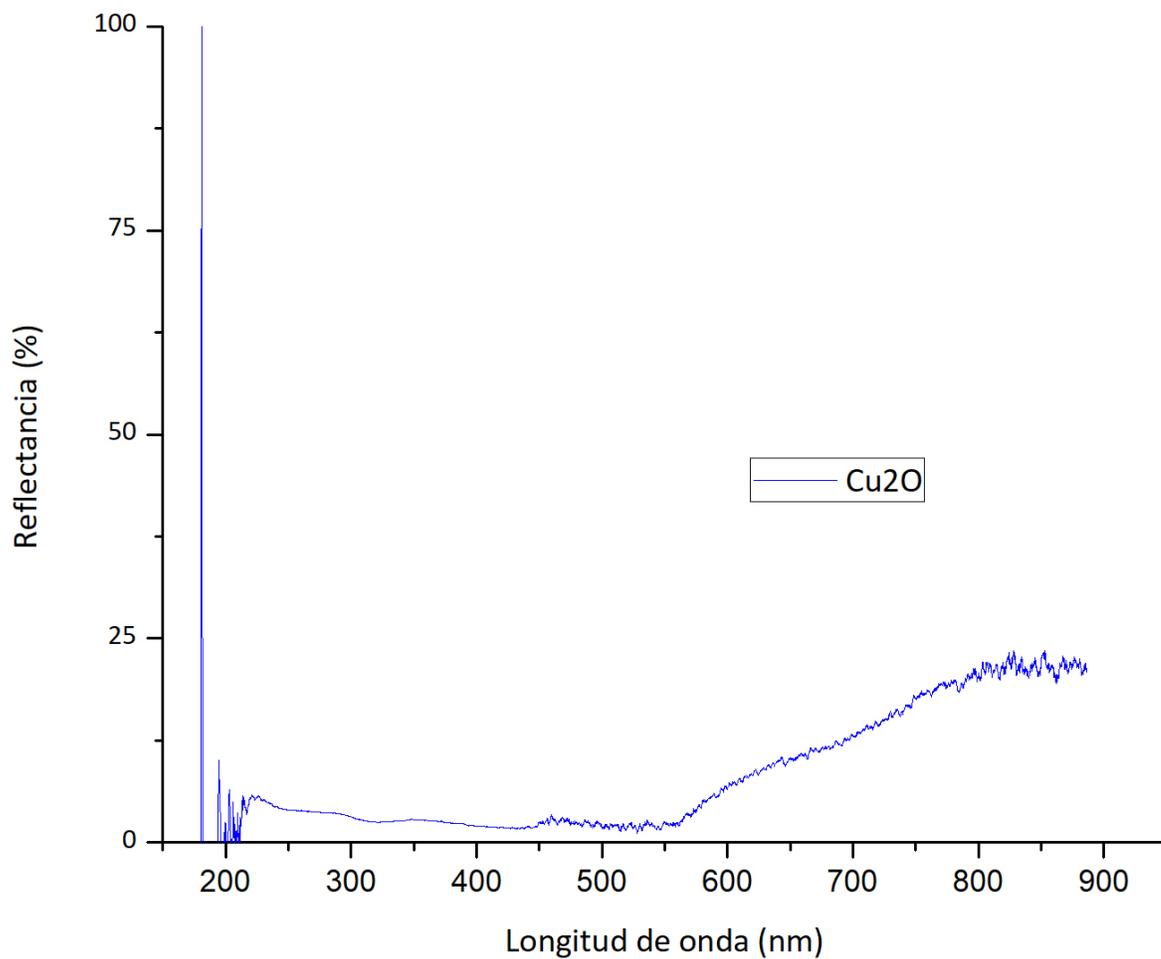


Figura 5.14: Curva de reflectancia del óxido de cobre (I).

Curva de reflectancia de Óxido de Cobre (II):

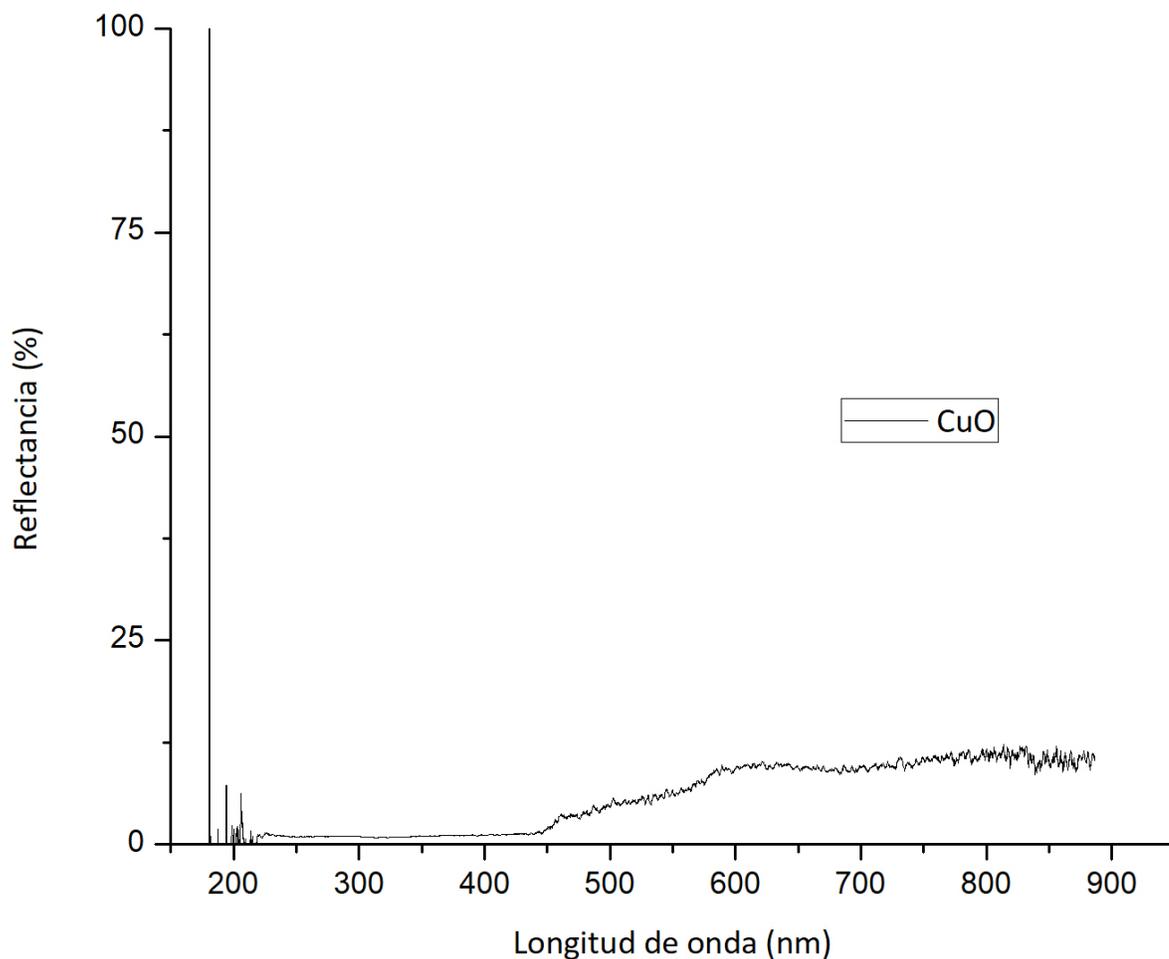


Figura 5.15: Curva de reflectancia del óxido de cobre (II).

En el caso de los óxidos de cobre se observa que a diferencia del cobre (fig. 5.12) tanto el Cu_2O (fig. 5.14) como el CuO (fig. 5.15) reflejan menos de un cuarto de la luz incidente cercana al infrarrojo y menos del 10% de la luz en el espectro UV, sin embargo, el Cu_2O refleja 5% más en el espectro infrarrojo.

Curva de reflectancia comparando el vidrio ITO y el vidrio ITO con depósito de micropartículas:

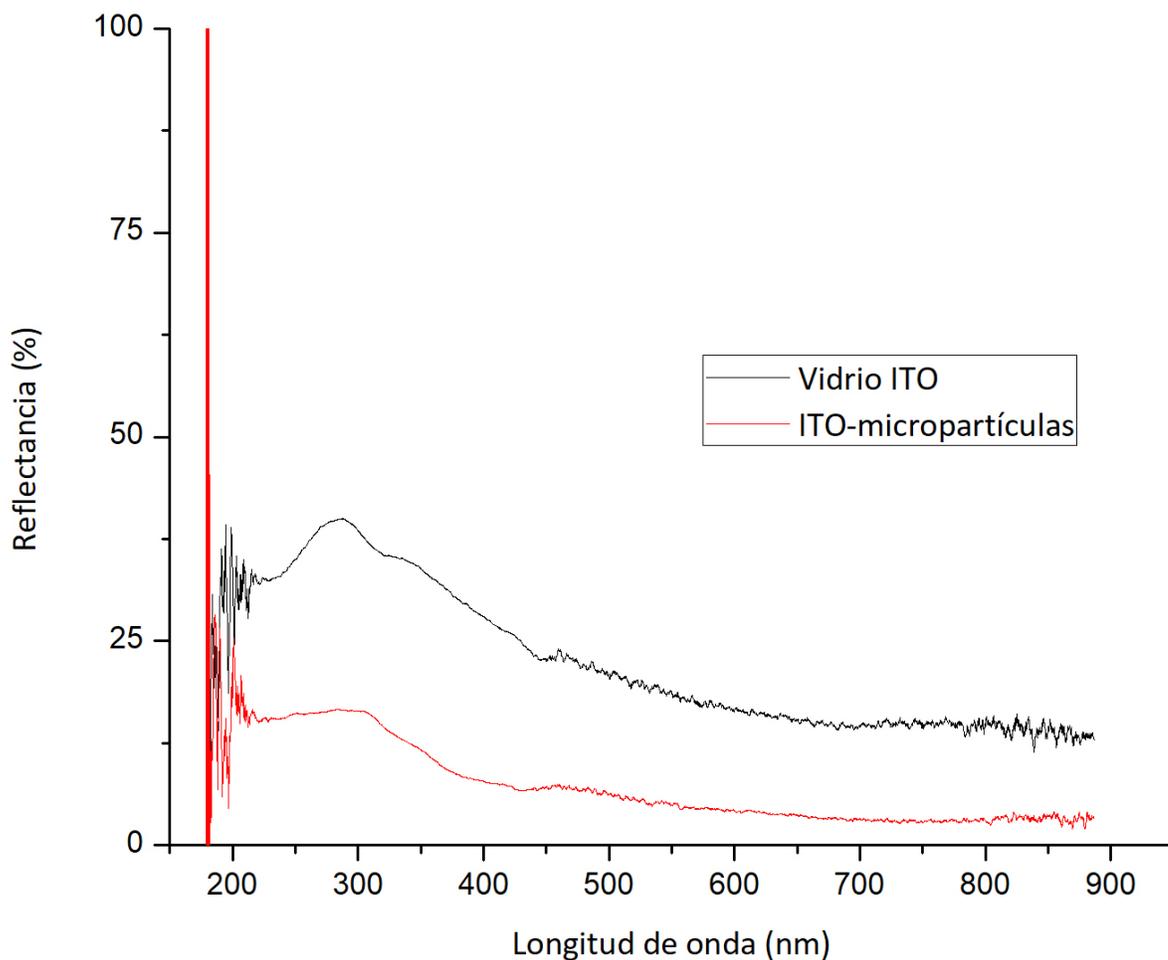


Figura 5.16: Curva de reflectancia comparación ITO e ITO-micropartículas.

Al momento de medir la diferencia de reflectancia entre un vidrio ITO tratado con micropartículas, de un vidrio ITO sin este tratamiento, se obtiene que el vidrio con micropartículas elimina los reflejos de la luz incidente en el material, lo que propicia que la luz incidente se aproveche de mejor manera absorbiendo la mayoría de la luz aplicada sobre la superficie del material.

Curva de reflectancia comparando los diferentes componentes de la celda.

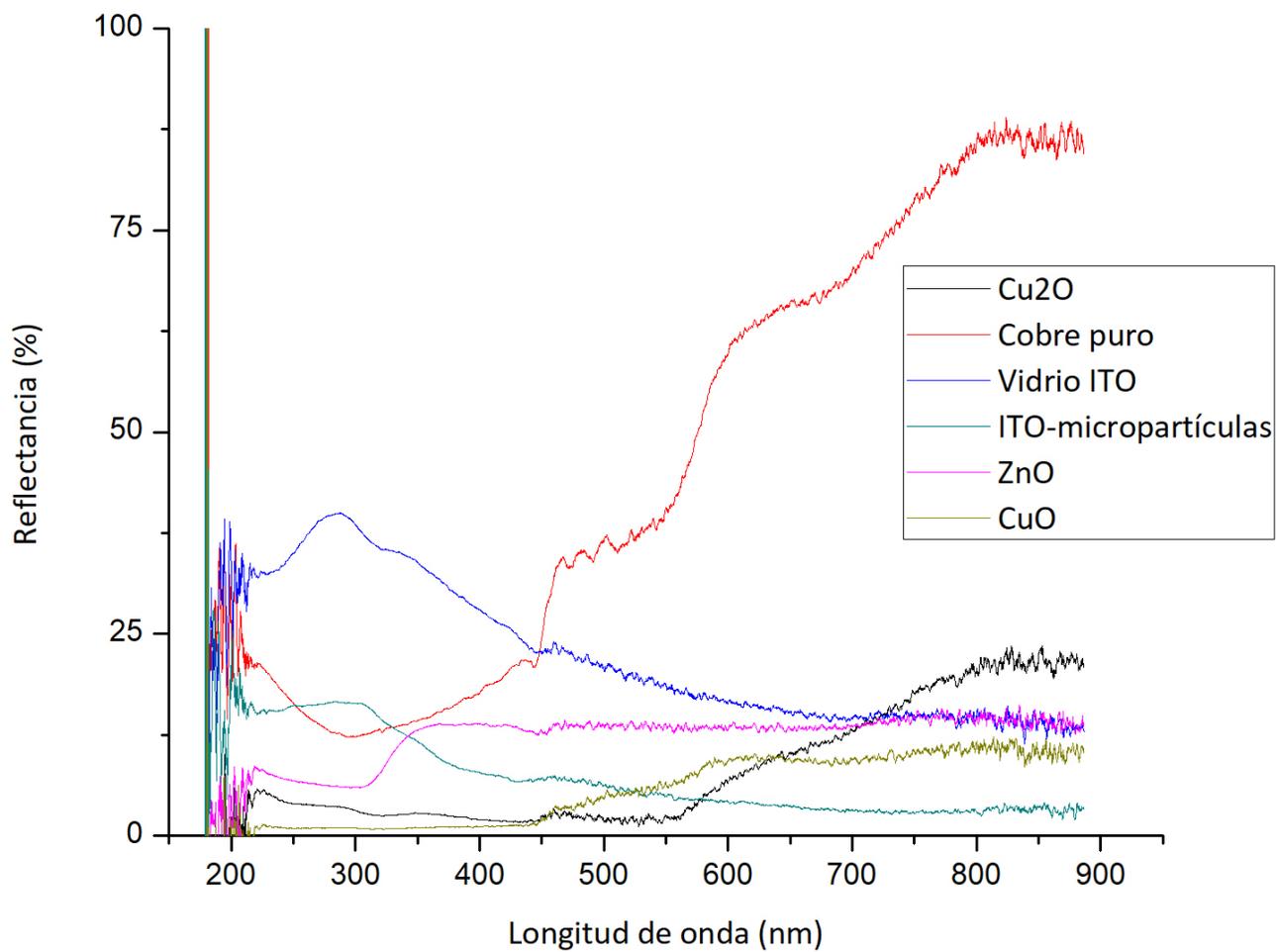


Figura 5.17: Curva de reflectancia comparando los componentes de la celda.

5.4.5. Curvas de transmitancia

Curva de transmitancia de ITO:

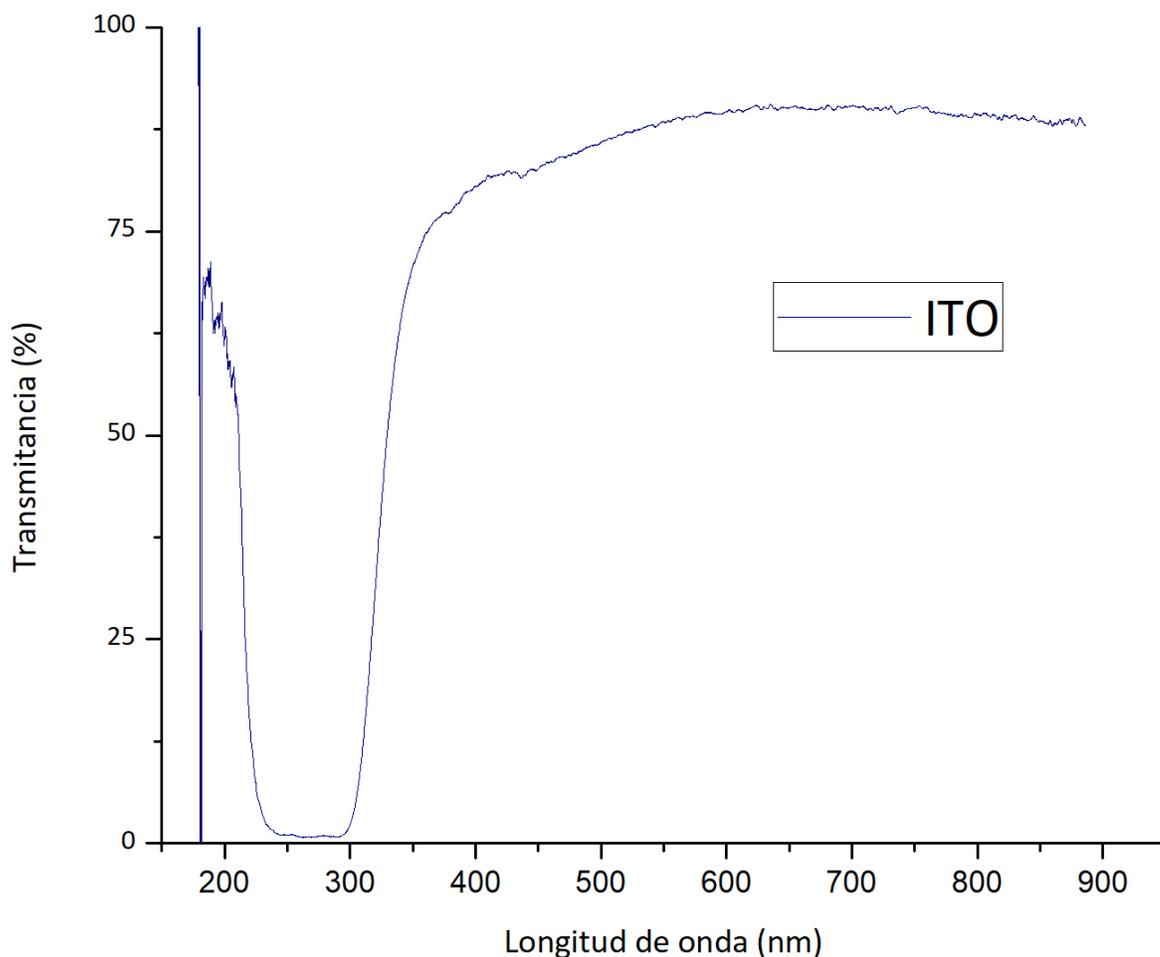


Figura 5.18: Curva de transmitancia de ITO.

La curva de transmitancia del vidrio ITO (fig. 5.18) se aprecia que no transmite nada de luz en el rango de los 250 *nm* a los 300 *nm* correspondiente a un rango de luz ultravioleta. El vidrio ITO deja pasar el 80% de la luz incidente en el rango del espectro visible, por lo que se puede decir que es un buen material para transmitir la luz ya que permite el mayor paso de luz incidente sobre el material.

Curva de transmitancia de ITO con un depósito de micropartículas en la superficie.

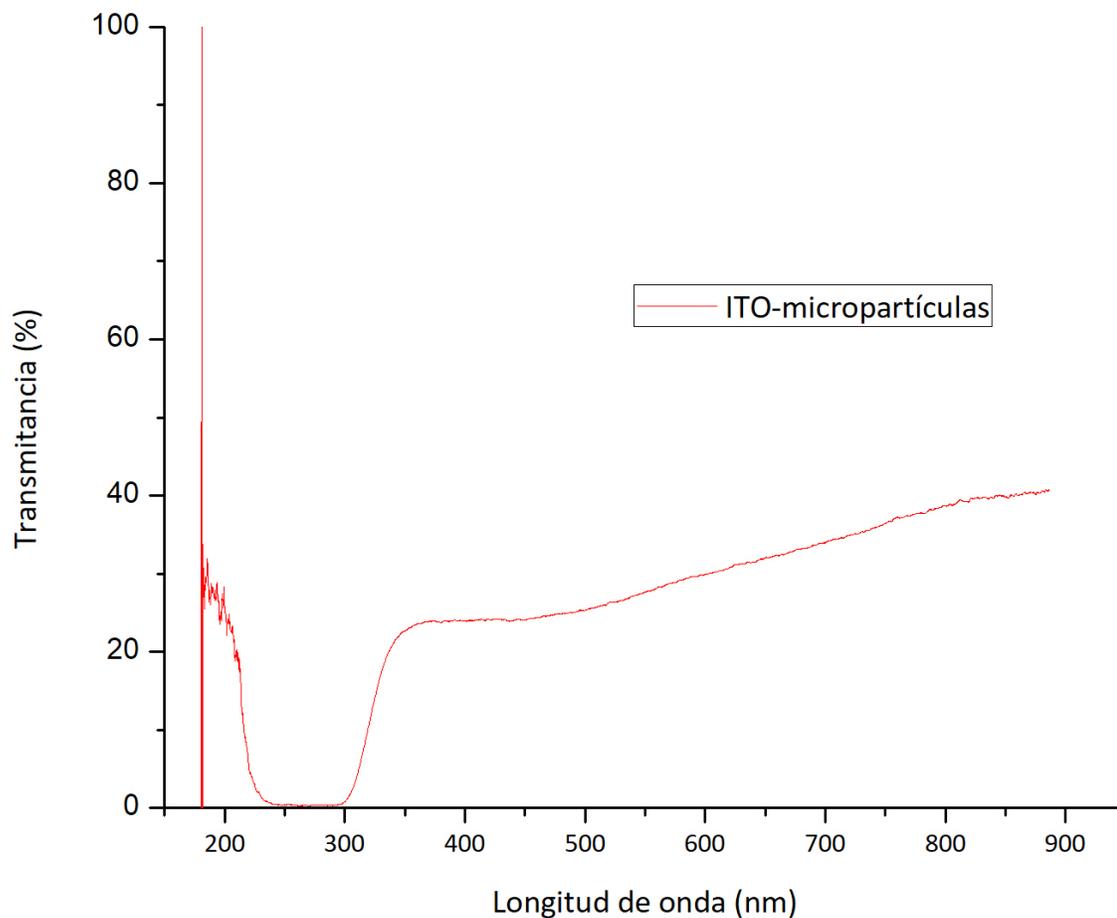


Figura 5.19: Curva de transmitancia ITO-micropartículas

La figura 5.19 correspondiente a la curva de transmitancia de vidrio ITO con tratamiento de micropartículas muestra que disminuye casi a la mitad la capacidad de transmitir luz sobre el material.

Curva de transmitancia de ITO con depósito de micropartículas teniendo como referencia el vidrio ITO.

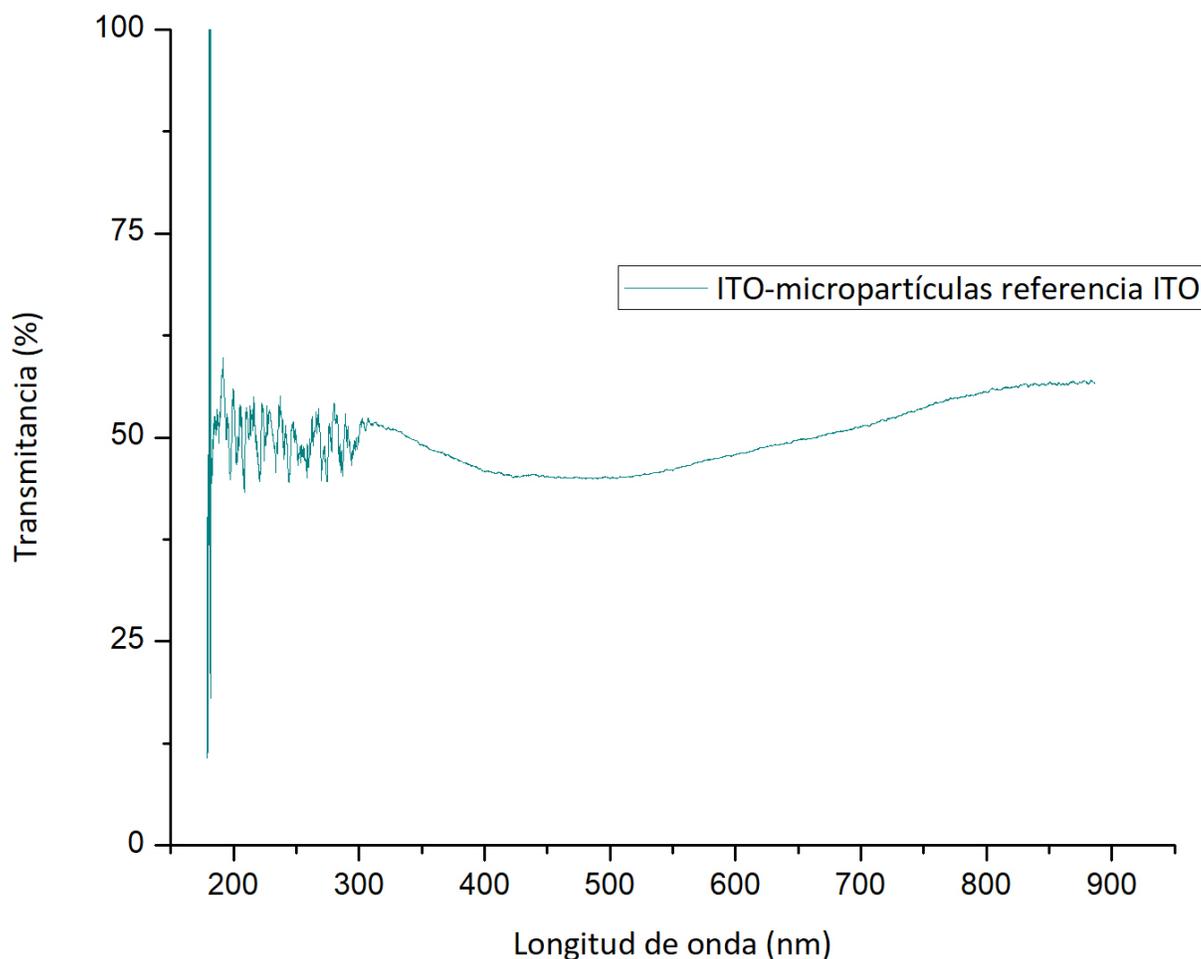


Figura 5.20: Curva de transmitancia ITO-micropartículas.

Se realizó una muestra utilizando como referencia el vidrio ITO, para determinar cuál es la transmitancia producida por las micropartículas de sílice, esta se muestra en la curva de la fig 5.20 en donde se obtuvo una transmitancia de 50% de la luz incidente, mostrando que las micropartículas están impidiendo el paso de la luz.

Comparación de las curvas de transmitancia.

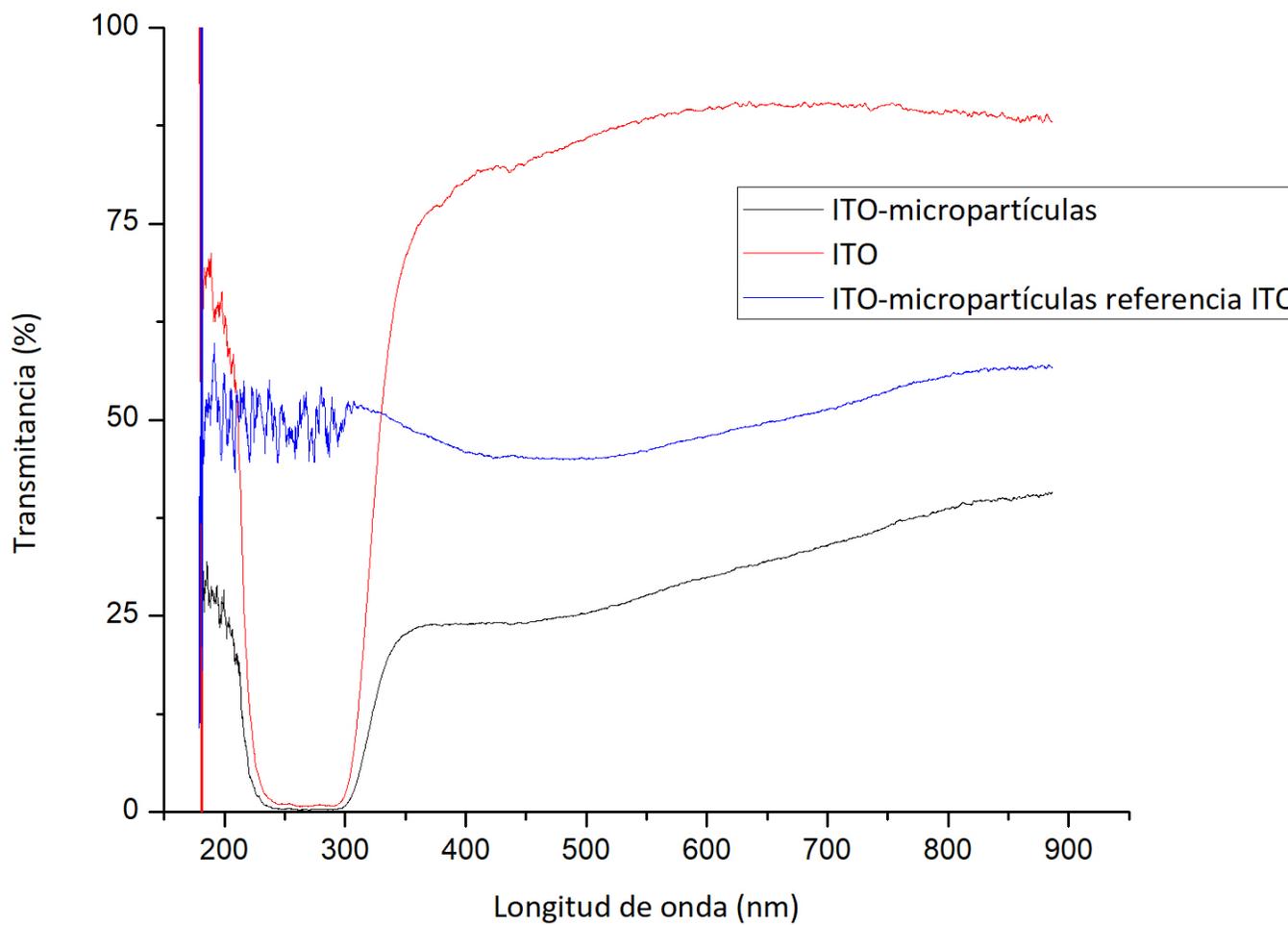


Figura 5.21: Comparativa de las curvas de transmitancia

5.5. Resumen de resultados de curvas de reflectancia y transmitancia

En las figuras de reflectancia de los materiales de cobre se encuentra que ambos son materiales opacos, ya que reflejan una cantidad mínima de luz a diferencia del cobre metálico que refleja la mayor parte del espectro visible. Se podrían utilizar estos materiales como la cara principal de la celda, debido a que aprovecharía la luz incidente; mismo caso con el ZnO que a pesar de ser un material blanquecino resulta opaco por los resultados del experimento, por lo que el material que quede en la cara expuesta de la celda resultaría indistinto, por lo que se prefiere trabajar con el óxido de zinc en la cara expuesta por la facilidad del ensamblaje.

En cuanto al ITO con micropartículas, es importante destacar que este material elimina los reflejos de la luz, lo que evita la pérdida de energía lumínica debido a los reflejos de la luz incidente en las celdas. Sin embargo, a pesar de esta ventaja, no logra transmitir la luz de manera adecuada. Como resultado, la luz incidente no alcanza a llegar al material, y en relación con su reflectancia, la mayor parte de la luz es absorbida, lo que conlleva al desperdicio de más de la mitad de la energía del espectro que no llega a la celda, lo que a su vez reduce la eficiencia.

En conclusión, se ha establecido que el uso de micropartículas de sílice en la superficie del vidrio ITO no conduce a una mejora en las propiedades de la luz incidente, lo que afecta negativamente la eficiencia de la celda.

Conclusiones

- Se experimentó con diferentes técnicas para producir óxidos metálicos para fabricar celdas solares, se puede concluir que la mejor forma de obtener una celda de materiales semiconductores de bajo costo es la junta n-p de óxido cúprico CuO y óxido de zinc, el óxido cúprico resulta muy buena opción en tema de eficiencia al aprovechar mejor el espectro electromagnético y dar una respuesta considerable de potencial eléctrico.
- De las diferentes técnicas probadas la mejor técnica fue el horneado por la rápida obtención del óxido de cobre y su homogeneidad obtenida en el proceso.
- Comprar el óxido de zinc es más económico que obtenerlo por cualquier medio químico o electroquímico a baja escala de producción.
- Se investigó el uso de los materiales como diodos y se determinó que conviene utilizar la junta de CuO/ZnO como diodo semiconductor, ya que este material tiene un comportamiento ideal como semiconductor.
- Se estableció una metodología para obtener una celda solar que es el arreglo tipo sándwich utilizando la junta de materiales CuO/ZnO e ITO como material conductor.
- La síntesis de micropartículas con la que se trabajó en el proyecto obtiene buenos parámetros en cuanto a tamaños y una baja dispersión en los mismos.
- Se logró depositar una película uniforme de micropartículas sobre la superficie del vidrio ITO de la celda solar.
- Se logró hacer un depósito exitoso con un buen acomodo sobre la superficie del ITO.
- Se logró realizar un arreglo de celdas solares en serie generando una diferencia de potencial de 5V utilizando la luz del exterior, por lo que se considera que se obtiene una celda solar funcional.

- El empleo de micropartículas en la superficie no ha demostrado ser una solución significativa para mejorar el rendimiento de la celda. Se había anticipado que estas micropartículas podrían optimizar la captación de luz incidente al reducir los reflejos que resultan en la pérdida de una porción considerable de energía útil para la celda fotovoltaica. Sin embargo, en la práctica, se ha constatado que este enfoque conlleva un inconveniente importante: la dificultad para transmitir la luz a través de estas partículas. Esta dificultad ocasiona una disipación adicional de la energía presente en el espectro electromagnético, lo que contrarresta los posibles beneficios que se esperaban obtener con la incorporación de las micropartículas en la superficie de la celda.
- Tras analizar las curvas de reflectancia y transmisión de los materiales con y sin la presencia de micropartículas depositadas, se ha observado que dichas partículas son efectivas en la absorción de energía, aunque presentan limitaciones en cuanto a su capacidad para transmitirla. Este hallazgo sugiere una posible aplicación futura de estas micropartículas como dopante en la superficie del material semiconductor, en lugar de ser utilizadas en el vidrio conductor como se había contemplado inicialmente.

Al considerar la integración de las micropartículas como dopantes en la superficie del material semiconductor, se espera aprovechar su capacidad para absorber energía de manera efectiva, potenciando así el rendimiento general de la celda fotovoltaica. Este enfoque podría ofrecer una alternativa más prometedora en comparación con su utilización en la superficie del vidrio conductor, ya que permitiría maximizar la eficiencia de conversión de energía solar sin los inconvenientes asociados a la transmisión limitada de luz.

- Invertir en investigación sobre aprovechamiento de la energía solar es redituable, debido a que es una energía que genera baja cantidad de contaminantes, incluso en el proceso de fabricación de estas tecnologías, son duraderas y hay proyectos grandes en el país para instalar estos dispositivos en lugares donde se puede aprovechar la incidencia de la luz del sol como se está trabajando en el estado de Sonora.
- Este proyecto logró obtener una celda funcional y abre la puerta a aplicaciones con estos materiales, como en pinturas donde se desee una superficie fotoeléctrica, diodos y paneles solares.

Bibliografía

1. Beverskog, B., Puigdomenech, I. (1997). Revised pourbaix diagrams for zinc at 25300. *Corrosive Science*, 39(1), 107114. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(97\)89246-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(97)89246-3)
2. Callister, W. (1998). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. In Department of Materials Science and Engineering The University of Utah. (Segunda Ed). Reverté.
3. Carlos, L., J.M., Z., Erick, F., J.C., C. (2017). Effect of the temperature on the silica microparticle synthesis for improving efficiency in reaction media. *International Material Research Congress*, 3.
4. Farrera, L. (2015). *Conductores Semiconductores y Aislantes*. Facultad de Química, 18.
5. Fujimoto, K., Oku, T., Akiyama, T., Suzuki, A. (2013). Fabrication and characterization of copper oxide-zinc oxide solar cells prepared by electrodeposition. *Journal of Physics: Conference Series*, 433(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/433/1/012024>
6. Iller, R. K. (1979). *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica* (Wiley).
7. Ma. del Pilar Cañizares Macías, G. A. D. L. (2009). *Fundamentos de Química Analítica teoría y ejercicios*. (D. de Q. A. UNAM (ed.); 2° Edición).

8. Merino, L. (2014). Energías renovables (F. de la E. de la C. de Madrid (ed.)). <https://doi.org/10.178graph2-es>
9. Ministry of Energy (Mexico). (2018). Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2018. 21.
10. Morales, U. M. (2005). Síntesis de micropartículas coloidales de sílice y su caracterización por microscopía electrónica de barrido y fuerza atómica. UNAM.
11. Rojas, C. M. L. (2012). Diseño y síntesis de materiales a medida mediante el método Sol-Gel (UNED (ed.)).
12. Zimmer, T. (2014). Semiconductores y la unión P-N (p. 13). Universidad de Bordeaux.